

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Madalena Russi

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**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

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Russi, Madalena

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.-2012.

173 p.; 30cm

Orientador: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2012

1. Sistema combinado. 2. Sustentabilidade. 3. Aquecimento de água. 4. Calefação. 5. Conforto térmico.
I. Santos, Joaquim Cesar Pizzutti dos II. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

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

elaborada por
Madalena Russi

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

COMISSÃO EXAMINADORA:

Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/orientador)

Eduardo Grala da Cunha, Prof. Dr. (UFPEL)

Giane de Campos Grigoletti, Profa. Dra. (UFSM)

Santa Maria, 07 de março de 2012.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Joaquim César Pizzutti dos Santos, por sua valorosa orientação, dedicação e ensinamentos durante a realização desta pesquisa e em todos os momentos em que precisei de um mestre e amigo.

Aos meus pais, Maria Lourdes e Juventino Russi e meus irmãos Jumar, Daniel, Davi e Gilberto Russi pelo grande incentivo e apoio em todos os momentos.

Aos colegas do GEESE e do LABEASE e aos colegas de Mestrado que de alguma forma colaboraram.

Ao meu grande amigo e colega Arq. Egon Vettorazzi, pelos estudos em conjunto e as valorosas discussões em acerca do tema.

Ao Eng. Mecânico André Felipe B. Nunes, pelo auxílio determinante na realização dos cálculos e simulação computacional, sem os quais a pesquisa não seria possível.

Ao amigo Prof. Fabricio Ardais Medeiros, pelo incentivo e diversas discussões sobre pesquisa e metodologia da pesquisa.

Aos secretários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Sr. Eliomar Pappis e Sra. Daisy Rivas Mendes pelo constante auxílio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES) pela concessão bolsa de estudos que possibilitou maior dedicação à dissertação e a realização de pesquisas.

À Universidade Federal de Santa Maria por suas instalações e recursos oferecidos ao longo do mestrado.

Aos amigos, em especial Cristiane P. Pauli e Joyce Meotti, que souberam entender minha ausência e minha falta de paciência.

Aos Professores, Dr. Eduardo Grala da Cunha e Dr.^a Giane Grigoletti que aceitaram participar da banca examinadora, pelas críticas e sugestões oferecidas.

A todas as pessoas e entidades não citadas que colaboraram de alguma forma para a realização desse trabalho.

Dedicatória

Ao futuro...
Ainda há tempo!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

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

AUTOR: MADALENA RUSSI

ORIENTADOR: DR. JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS

Data e Local de Defesa: Santa Maria, 07 de março de 2012.

O aproveitamento da energia solar em edificações, para melhoria das condições ambientais de conforto, implica na redução do consumo de energia elétrica. Considerando que essa é uma energia limpa, renovável e abundante, o uso de estratégias de projeto que utilizam da energia do sol torna as edificações mais sustentáveis. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema combinado que faz a captação de energia solar no telhado das edificações, aplicando essa energia em dois propósitos diferentes. Uma fração dessa carga térmica é utilizada para o aquecimento da água de consumo, e outra parcela é destinada para o condicionamento térmico da edificação nos períodos frios, através de um sistema de calefação dos ambientes pelo insuflamento do ar aquecido. Foi definido primeiramente um pré-projeto do sistema combinado, sendo consideradas as condicionantes do projeto e analisados os materiais mais adequados quanto as suas características térmicas para utilização nas diversas partes do sistema. Baseado neste pré-projeto e na revisão de literatura foi possível desenvolver a modelagem matemática para avaliação da aplicabilidade do sistema para o clima para o qual foi proposto, a qual foi realizada considerando os dados climáticos do mês de julho. Os resultados obtidos demonstram que o subsistema de calefação conseguiu elevar a temperatura no interior da residência em até 7 °C no pico máximo, e durante aproximadamente 30% das horas conseguiu deixar a temperatura da edificação em conforto térmico. No subsistema de aquecimento de água, para o mês de julho, a temperatura aumentou em 5,5 °C, nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março a temperatura da água ultrapassa os 35 °C, podemos considerar, que a demanda de água quente, nesses meses seja suprida sem o uso de energia elétrica. Considerando que o mês adotado é julho, mês com irradiância solar mais limitada do ano, para a região do estudo, o sistema combinado proposto apresentou resultados positivos, os quais vão ainda melhorar para os outros meses do ano.

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

ABSTRACT

Master Thesis
Civil and Environmental Engineering Post-graduate Program
Universidade Federal de Santa Maria

DESIGN AND ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A MIXED SOLAR WATER HEATING AND THERMAL CONDITIONING OF BUILDINGS FOR A SANTA MARIA-RS

AUTHOR: MADALENA RUSSI

ADVISOR: DR. JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS

Date and Place of presentation: Santa Maria, 07th March 2012.

The use of solar energy in buildings, to improve the comfort environmental conditions implies in the reduction of energy consumption. Since this is a clean, renewable and abundant energy, the use of design strategies that use the sun's energy makes the buildings more sustainable. This study aimed to develop a combined system that captures solar energy on the roof of buildings, then using this energy in two different purposes. A fraction of this power is used for heating water, and the other portion is destined for building thermal conditioning in cold periods, through a heating system that inflating the heated air. First of all, it was defined a pre-project of the combined system, considering the constraints of the project and analyzed the appropriated materials and their thermal characteristics that would be used in various parts of the system. Based on this pre-design and review of the literature was possible to develop a mathematical model to evaluate the applicability of the system in the climate it was proposed, which was performed considering the July's climatic data. The results obtained shows that the heating subsystem could elevate the temperature within the residence up to 7 °C at most, and for about 30% of hours to let the building's temperature achieved thermal comfort. In the water heating Subsystem, in the month of July, the temperature increased by 5.5 °C and in the months of December, January, February and March the water temperature exceeds 35 °C, we can consider that the hot water demand in these months is met without the use of electricity. Considering the month adopted as July, a month with limited solar irradiance of the year, for study purpose, this combined system showed positive results, which will also improve for other months of the year.

Keywords: Combisystem. Sustainability. water heating. heating. thermal comfort.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Conceito clássico x conceito atual.....	23
Figura 1.2 – Participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade das residências na região sul do Brasil (2005).....	25
Figura 2.1 – Gráfico da radiação solar relacionada com o ciclo dos 11 anos do sol em todo o mundo. (Gráfico adaptado de Goddard Institute for Space Studies Data and Images: Solar Irradiance).....	30
Figura 2.2 – Diagrama esquemático dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.....	31
Figura 2.3 – Formas da radiação solar na superfície terrestre.	32
Figura 2.4 – Diferentes faixas do espectro de radiação de acordo com o comprimento de onda.....	33
Figura 2.5 – Gráfico do ano de 1995, 2025 e 2050: Geração de energia mundial por ano.	34
Figura 2.6 – O Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro.....	37
Figura 2.7 – Zoneamento bioclimático para o Brasil.....	38
Figura 2.8 – Localização da cidade de Santa Maria - RS.....	39
Figura 2.9 – Radiação Média (kWh/m ² /mês) em uma superfície horizontal para a cidade de Santa Maria-RS	41
Figura 2.10 – Irradiação média anual e a variabilidade mensal da irradiação anual.....	44
Figura 2.11 – Gráficos comparativos entre a irradiação média mensal e a variabilidade da irradiação média diária para a região sul e para todo o Brasil.	44
Figura 2.12 – Insolação diária, Média Anual (horas)	45
Figura 2.13 – Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras.	46
Figura 2.14 –Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras.	
Figura 2.15 – Fluxograma das aplicações práticas da energia solar.....	48
Figura 2.16 – Características gerais de um sistema solar de aquecimento (ativo ou passivo)	48
Figura 2.17 – Calefação solar por meio de ar.	50
Figura 2.18 – Calefação solar por meio de água.....	51
Figura 2.19 – Calefação por meio de ar quente.	52
Figura 2.20 – Detalhe das placas coletoras sobre o telhado na Casa Eficiente.....	53
Figura 2.21 – Reservatório térmico usado na Casa Eficiente.....	53
Figura 2.22 – Esquema de funcionamento de sistema de calefação de ambientes..	54
Figura 2.23 – Curva de carga diária média no Brasil.....	58
Figura 2.24 – Curva de carga diária média na região Sul.	58
Figura 2.25 – Sistema solar doméstico de água quente.....	59
Figura 2.26 – Coletor solar plano fechado.....	61

Figura 2.27 – Coletor solar plano aberto.....	61
Figura 2.28 – Corte lateral de um coletor de placa plana (CPP) mostrando as perdas e os ganhos de calor.....	62
Figura 2.29 – Transmitância do vidro comum em função do comprimento de onda.	63
Figura 2.30 – Esquema construtivo de um reservatório de água quente solar	64
Figura 2.31 – Exemplos de sifão na entrada de água fria.....	67
Figura 2.32 – Circulação natural ou termossifão.....	70
Figura 2.33 – Sistema de circulação forçada.....	71
Figura 2.34 – Sistema de aquecimento alternativo de Souza.	72
Figura 2.35 – Sistema ASBC.	73
Figura 2.36 – Esquema dos componentes do sistema de aquecimento solar de água Mineração Jundu.	74
Figura 2.37 – Esquema de Pré-aquecedor solar.	75
Figura 2.38 – Sistema solar combinado em propriedades individuais, na Áustria. ...	76
Figura 2.39 – Bloco de aquecimento.	77
Figura 2.40 – Esquema do sistema de distribuição de calor pelo espaço de aquecimento de uma edificação genérica.....	80
Figura 2.41 – Sistema solar combinado – modelo genérico na Alemanha.	81
Figura 2.42 – Sistema solar combinado – modelo genérico utilizado na Suíça.	82
Figura 3.1 – Perspectiva da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.....	101
Figura 3.2 – Planta da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.	102
Figura 3.3 – Corte c - c da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.....	103
Figura 3.4 – Esquema de interligação dos subsistemas que formam o sistema combinado.	107
Figura 3.5 – Composição da edificação.....	108
Figura 3.6 – Disposição dos subsistemas na cobertura.....	109
Figura 3.7 – Disposição do sistema combinado proposto na residência.	110
Figura 3.8 – Corte A-A evidenciando o sistema de aquecimento de água.	113
Figura 3.9 – Placa coletora solar modelo Soletrol Max Mini Cobre®.....	114
Figura 3.10 – Reservatório térmico escolhido: Superboiler Soletrol Max.....	116
Figura 3.11 – Circulação do ar dentro da cobertura.....	118
Figura 3.12 – Corte B-B evidenciando os subsistemas da calefação.	119
Figura 3.13 – Exaustor Tron.	120
Figura 3.14 – Corte C-C evidenciando a chaminé para a retirada do ar quente da edificação nos períodos de calor.	122
Figura 4.1 – Representação dos fluxos térmicos que envolvem o sistema de calefação e a casa.	123
Figura 4.2 – Subsistema de calefação, evidenciando o subsistema de armazenamento – SSA.....	124
Figura 4.3 – Representação esquemática do balanço de energia no subsistema de armazenagem de calor - SSA.....	125

Figura 4.4 – Subsistema de calefação, evidenciando o coletor solar - SSCC.....	130
Figura 4.5 – Representação esquemática do balanço de energia no coletor SSCC.	130
Figura 4.6 – Representação dos fluxos de calor no subsistema de aquecimento de água.	132
Figura 4.7 – Subsistema de aquecimento de água, evidenciando o reservatório térmico – SSR.	133
Figura 4.8 – Representação esquemática do balanço de energia no reservatório térmico – SSR.	134
Figura 4.9 – Subsistema de aquecimento de água, evidenciando o painel coletor solar - SSP.	135
Figura 4.10 Representação esquemática do balanço de energia no painel coletor solar - SSP.....	136
Figura 4.11 – Circuito de resistências térmicas da parede.....	148
Figura 4.12 – Materiais que compõem o reservatório.	150
Figura 4.13 – Circuito de resistências térmicas para o reservatório.....	151
Figura 4.14 – Coletor solar para calefação SSCC.....	153
Figura 5.1 – Rotina desenvolvida para simulação do sistema de calefação	156
Figura 5.2 – Rotina desenvolvida para simulação do sistema de aquecimento de água.	157
Figura 6.1 – Variação ao longo do dia da irradiação solar e das temperaturas externa e interna sem e com o uso da calefação	160
Figura 6.2 – Relação entre as temperaturas interna sem e com o uso da calefação e os limites de conforto estabelecidos pela NBR 16401 (ABNT,2008).	161
Figura 6.3 – Gráficos com as temperaturas resultantes para água quente divididos em estações do ano	163
Figura 6.4 – Relação entre Irradiação solar e a temperatura da água de consumo sem e com o uso do aquecimento solar	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores que afetam a intensidade da radiação em uma superfície.....	33
Tabela 2.2 – Dia típico de projeto para Santa Maria – RS.....	40
Tabela 2.3 – Estatísticas mensais da velocidade do vento (m/s).....	40
Tabela 2.4 – Radiação solar média para Santa Maria, RS (kWh/m ² /dia).....	41
Tabela 2.5– Condições internas para verão.	42
Tabela 2.6 – Condições internas para inverno.....	43
Tabela 2.7 – Consumo diário de água quente por dia.	65
Tabela 2.8 – Consumo de água quente por pessoa	65
Tabela 2.9 – Lista dos materiais e suas propriedades térmicas a temperatura ambiente.	87
Tabela 3.1– Materiais componentes da edificação e suas características térmicas.....	104
Tabela 3.2 – Materiais e características da cobertura.....	111
Tabela 3.3 – Características do painel coletor solar do subsistema de aquecimento de água	114
Tabela 3.4 – Características da tubulação no trecho entre o painel coletor e o reservatório térmico.....	115
Tabela 3.5 – Características do reservatório térmico Modelo Superboiler Soletrol Max®.....	116
Tabela 3.6 – Características do exaustor utilizado no subsistema de calefação. ...	121
Tabela 4.1 – Densidade da água a pressão atmosférica.....	138
Tabela 4.2 – Viscosidade do ar a pressão atmosférica.....	139
Tabela 4.3 – Densidade do ar a pressão atmosférica.....	140
Tabela 4.4 – Condutividade térmica e número de Prandlt do ar à pressão atmosférica.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS

a	– Difusividade térmica
ABNT	– Associação brasileira de normas técnicas
ABRAVA	– Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento
ASBC	– Aquecedor Solar de Baixo Custo
b	– Efusividade térmica
BSW-Solar	– Associação da Indústria Solar Alemã
c	– Calor específico
CAPES	– Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CDT	– Controlador Diferencial de Temperatura
CHESF	– Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CIETEC/SP	– Centro Incubador de Empresas Tecnológicas
cm	– Centímetro
CRESESB	– Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
GEESE	– Grupo de eficiência energética e sustentabilidade em edificações
GTZ	– Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit Sociedade de Cooperação Técnica
INMET	– Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IST	– Irradiância solar total
J/kg. K	– Joule por quilogramas e por Kelvin
KW	– Quilowatt
LABEESE	– Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações
LABSOLAR/UFSC	– Laboratório de Energia Solar-UFSC
LASL	– Los Alamos Scientific Laboratory Laboratório Científico de Los Alamos
m	– Metro
m.c.a	– Metros de coluna d'água
MWh	– Megawatt hora
NASA	– (National Aeronautics and Space Administration) Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço
PNAC	– Plano Nacional de alterações climáticas
PNAEE	– Plano Nacional de acção para a eficiência energética
PNALE	– Plano Nacional de atribuições de licenças de emissão
PNMC	– Política Nacional de Mudanças Climáticas
PPGEC	– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PROCEL	– Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
REEEP	– Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership

	Sociedade de Energia Renovável e Eficiência Energética
REN21	– Relatório Global de Energia Renováveis de 2010
SAS	– Sistema de aquecimento solar
SWERA	– Solar and Wind Energy Resource Assessment Avaliação de Recursos de Energia Vento e Solar
TMY	– Typical Meteorological Year Ano de Meteorologia típico
UFPE	– Universidade Federal de Pernambuco
UFPEL	– Universidade Federal de Pelotas
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria
UNSEGED	– United Nations Solar Energy Group for Environment and Development Grupo de Energia Solar para o meio-ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas
W	– Watt
W/mK	– Watt por metro por kelvin
λ	– Condutividade térmica
μ	– Coeficiente de amortecimento
μm	– Micrometro
ρ	– Densidade
ρc	– Calor volumétrico
$^{\circ}\text{C}$	– Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Justificativa	26
1.2	Objetivos	27
1.2.1	Objetivo Geral.....	27
1.2.2	Objetivos Específicos.....	27
2	REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1	A radiação solar	29
2.1.1	O aproveitamento da energia solar.....	34
2.1.2	O aproveitamento da energia solar no Brasil.....	35
2.1.3	Características do clima na região central do Rio grande do Sul	38
2.2	Condições de conforto para a cidade de Santa Maria	42
2.3	Disponibilidade de energia solar no Brasil	43
2.4	Formas de utilização da radiação solar em edificações	47
2.4.1	Aquecimento de ambientes - calefação	49
2.4.2	Aquecimento solar passivo	54
2.4.3	Sistemas de aquecimento de água com energia solar	56
2.4.3.1	Componentes de um sistema de aquecimento de água com energia solar	59
2.4.3.2	Tipos de circulação nos sistemas de aquecimento de água.....	69
2.4.3.3	Aquecedores de água de baixo custo.....	71
2.4.2.4	Sistemas Solares Combinados - <i>Combisystems</i>	76
2.5	Propriedades dos materiais	83
2.4.1	Condutividade Térmica (k):.....	83
2.5.1	Calor Específico (c):.....	83
2.5.2	Densidade (ρ):	84
2.5.3	Calor específico volumétrico (ρc):.....	84
2.5.5	Difusividade térmica (a):	85
2.5.6	Efusividade Térmica (b):.....	86
2.5.7	Inércia térmica	86
2.6	Conceitos térmicos fundamentais	88
2.6.1	Irradiância	88
2.6.2	Transferência de calor por condução, convecção e radiação.....	88
2.6.2.1	Condução	88
2.6.2.2	Convecção	89
2.6.2.3	Radiação.....	93
2.6.3	Determinação do fluxo de calor baseado em resistências térmicas	95
2.6.4	Eficiência dos sistemas de aquecimento solar de água.....	97
2.7	Modelos Matemáticos para simulação do fluxo de calor em sistemas de calefação e aquecimento de água	98
2.7.1	Lei da Continuidade	99
2.7.2	Equação da Energia	99
3	DESENVOLVIMENTO DO ANTEPROJETO	101
3.1	Edificação modelo considerada para implantação do sistema combinado	101
3.2	Condicionantes impostos ao projeto	105
3.3	Descrição física do sistema combinado proposto	106

3.3.1	Captação da energia solar	110
3.3.2	Subsistema de aquecimento de água	112
3.3.3	Subsistema de calefação de ambientes	117
4	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	123
4.1	Modelagem matemática do sistema de calefação	123
4.1.1	Balanço de energia no subsistema de armazenamento (SSA)	124
4.1.2	Balanço de energia no subsistema de coleta de irradiação para calefação (SSCC).....	130
4.2	Modelagem do sistema de aquecimento de água.....	132
4.2.1	Balanço de energia no reservatório de água quente (SSR)	133
4.2.2	Balanço de energia nas placas coletoras de calor para o sistema de aquecimento de água.....	135
4.3	Definição dos parâmetros de entrada.....	137
4.3.1	Parâmetros Térmicos	138
4.3.1.1	Densidade (ρ_{H2O}) e calor específico C_{pH2O} da água	138
4.3.2	Densidade (ρ), calor específico C_p , viscosidade (μ^∞), número de Prandtl (Pr) e condutividade térmica (k^∞) do ar para o sistema	139
4.3.3	Coeficientes de transferência de calor por convecção (h)	141
4.3.4	Equações de troca térmica.....	143
4.3.4.1	Calor que entra no sistema (Q_e)	144
4.3.4.2	Perdas de calor do sistema (Q_p)	146
4.3.5	Dimensões físicas	152
4.3.5.1	Volume de ar no subsistema de coleta de calor para calefação (V_{cc})....	153
4.3.5.2	Volume de ar contido no subsistema armazenamento (edificação) (V_a)	153
4.3.5.3	Volume de água contida no subsistema coleta de calor para aquecimento de água (V_p)	153
4.3.5.4	Volume de água contido no interior do reservatório térmico (V_r)	153
5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	155
5.1	O programa desenvolvido.....	155
5.2	Parâmetros de simulação	157
6	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	159
6.1	Resultados referentes ao subsistema de calefação de ambientes	159
6.2	Resultados referentes ao subsistema de aquecimento de água.....	161
7	CONCLUSÕES	165
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

1 INTRODUÇÃO

Na antiguidade, o projeto arquitetônico tinha grande responsabilidade na obtenção de conforto para os usuários das edificações. Os projetistas se valiam de engenhosos artifícios para dar conforto aos usuários. Com a evolução das ciências os edifícios passaram a serem condicionados artificialmente por meio de aparelhos mecânicos e elétricos para aquecer, arrefecer, ventilar e iluminar. Com isso, a envoltória do edifício deixou de ser o principal moderador do clima exterior no ambiente interno e os projetistas passaram a abdicar da responsabilidade da climatização natural e da suficiência de energia. Com o constante aumento da demanda de energia elétrica e a crescente preocupação ambiental, cada vez mais é necessário buscar alternativas para solucionar essa dependência projetando edificações energeticamente mais eficientes e formas alternativas de geração de energia.

Segundo Lamberts et al (1997) o triângulo conceitual clássico de Vitruvius pode ser acrescido de um vértice (o da eficiência energética), transformando-se no conceito ideal para a arquitetura contemporânea, como exemplifica a Figura 1.1.

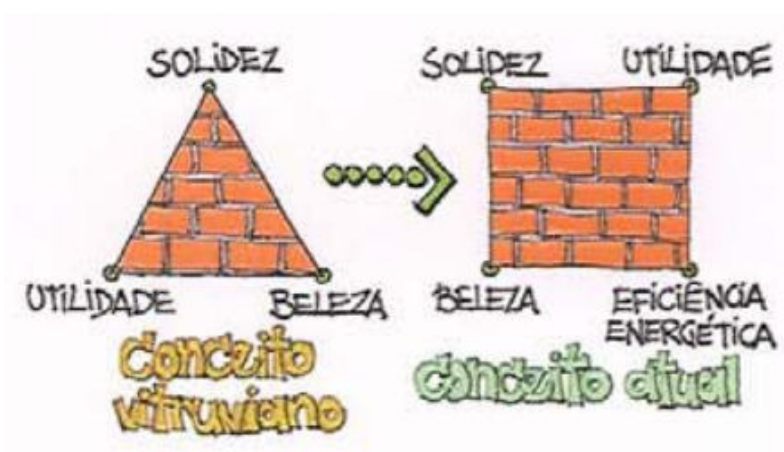


Figura 1.1 – Conceito clássico x conceito atual.

Fonte: Lamberts et al (1997).

A energia, nas suas mais diversas formas, tornou-se indispensável à

sobrevivência do homem, sendo que a eletricidade é uma das formas mais versáteis e práticas de energia, passando a ser indispensável e estratégica para o desenvolvimento socioeconômico.

A energia hidráulica é a principal fonte de energia para geração de eletricidade no Brasil. Apesar de ser considerada uma fonte renovável e limpa, as usinas hidroelétricas produzem um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido ao alagamento de grandes áreas cultiváveis (STIVARI, 2005). De acordo com Fearnside (2005), estudos demonstram que gases do efeito estufa, principalmente o metano, são emitidos para atmosfera em consequência de processos de degradação anaeróbica da matéria orgânica que ocorrem em áreas alagadas. Além disso, as principais bacias hidrográficas brasileiras com capacidade de geração hidroelétrica de alta densidade energética já estão praticamente esgotadas nos principais centros consumidores do país (PEREIRA et al., 2006).

Entre as propostas governamentais para a racionalização do consumo de energia elétrica está a criação da Lei nº 10.295, de 2001, a qual estabelece uma Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, com o objetivo de reduzir os investimentos na ampliação da capacidade do sistema elétrico, (BRASIL, 2001).

Segundo Aldabó (2002), a energia solar é a fonte menos poluente e menos finita conhecida até o momento, disponível para a humanidade desde o surgimento da vida na Terra. O aproveitamento da energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para o novo milênio, pois é abundante e permanente, renovável a cada dia, não polui e nem prejudica o ecossistema, sendo a solução interessante para áreas afastadas e ainda não eletrificadas, especialmente no Brasil, que apresenta bons índices de insolação em qualquer parte do território.

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). A Figura 1.2 apresenta um gráfico que demonstra a participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade nas residências na região sul do país.

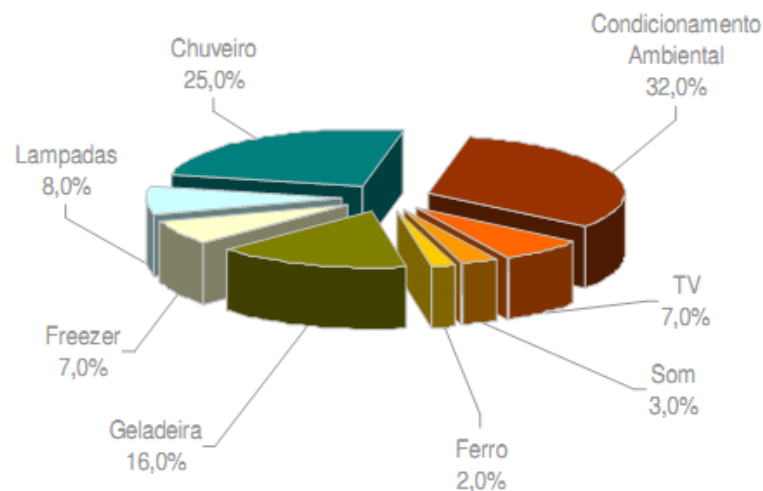


Figura 1.2 – Participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade das residências na região sul do Brasil (2005)

Fonte: ELETROBRAS/PROCEL (2007).

O condicionamento ambiental considerado no gráfico engloba o uso de mecanismos para refrigeração e calefação de ambientes. 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.

Na busca por eficiência energética nas edificações devem ser considerados como objetivos importantes a melhoria dos hábitos de consumo e a introdução de novas tecnologias. Segundo Lamberts et al., (1997) um edifício é considerado energeticamente mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais de conforto ao seu usuário, com menor consumo de energia. Algumas medidas devem ser incentivadas a fim de conscientizar a população sobre os benefícios da utilização eficiente dos recursos energéticos.

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 ambientes, buscando disponibilizar soluções que aumentem o conforto do usuário e amenize os problemas ambientais causados pelo alto dispêndio energético gerado pelos equipamentos tradicionais.

Para os estudos do presente projeto foi escolhida a cidade de Santa Maria –

RS, que está situada na zona bioclimática dois do Brasil, região subtropical, e marcada por entradas de frentes frias e grandes variações de temperatura ao longo do dia e das estações do ano.

1.1 Justificativa

Os países em desenvolvimento sofrem com a falta de mecanismos e estratégias de projeto que tragam conforto de maneira passiva para as edificações. Nem projetistas nem usuários estão atentos à necessidade de adequação do projeto ao meio ambiente no qual ele será inserido. Nas questões que envolvem o conforto térmico do ambiente, normalmente a solução utilizada é o condicionamento térmico artificial, tanto para aquecer como para refrigerar. O aquecimento de água para consumo normalmente é feito utilizando chuveiros elétricos. Permanecendo a mesma oferta de energia elétrica fatalmente acarretará problemas como o estrangulamento energético.

No Brasil, já foram feitas diversas pesquisas sobre aquecedores de água alternativos, alguns deles foram implantadas com êxito, já sobre calefação de edificações, utilizando a energia solar, não existem muitos estudos, pois é pequena a região inserida no clima subtropical, com necessidade de aquecimento. Na região objeto deste estudo ocorre um período de temperaturas baixas, com longos períodos de desconforto térmico causado pelo frio, esse desconforto é normalmente suprido por aparelhos que usam energia elétrica.

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 da demanda de energia elétrica, resultando assim em edificações mais sustentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

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.

1.2.2 Objetivos Específicos

Definição de um pré-projeto para um sistema que envolva captação de energia solar, aquecimento de água de consumo e calefação de ambientes;

Desenvolvimento de um modelo de cálculo que explique matematicamente o funcionamento do pré-projeto proposto, para a verificação da eficiência e da potencialidade do sistema;

Proposta de soluções que melhorem o rendimento do sistema proposto e/ou permitam sua aplicação com menor custo e maior praticidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica com assuntos relevantes ao presente trabalho como a radiação solar, sua disponibilidade na região escolhida e as características do clima na região para o projeto, o estudo das propriedades dos materiais mais adequados a serem utilizados, e as formas mais comuns de utilização passiva da energia solar.

Sendo assim este capítulo dedicou-se a pesquisar os diversos tipos de tecnologias que vem ao encontro de temas que visam à criação de edificações energeticamente eficientes e mais sustentáveis.

2.1 A radiação solar

O sol é a nossa maior fonte de energia, ela é gratuita e renovável. Frota e Schiffer (2003) explicam que a radiação solar é uma energia eletromagnética de onda curta, que atinge a terra após ser parcialmente absorvida pela atmosfera. Para Dias (2003), a porcentagem de energia que chega à superfície é de cerca de 47% daquela que atinge a camada superior à atmosfera, dependendo das condições climáticas e da latitude local.

A densidade de fluxo de energia solar (ou irradiância solar) que chega ao topo da atmosfera terrestre é expressa nas unidades de W/m^2 (razão da potência pela área). Um parâmetro usado para caracterizar a entrada de radiação solar na atmosfera é a constante solar, definida como a irradiância solar no topo da atmosfera. Seu valor pode ser estimado dividindo-se a emitância total do Sol pela área de uma esfera cujo raio seja igual à distância média entre a Terra e o Sol (VIANELLO E ALVES, 1991). A irradiância solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é variável ao longo do ano, em virtude dos efeitos astronômicos, principalmente aqueles ligados à órbita da Terra ao redor do Sol. Ademais, a intensidade de radiação emitida pelo Sol é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (manchas solares, erupções solares, variações de temperatura na atmosfera solar).

Segundo dados publicados (<http://www.nasa.gov/>) pelo site oficial da *National*

Aeronautics and Space Administration (NASA), medições mostram que aproximadamente 1.367 W/m^2 de energia solar, em média, iluminam a parte externa da atmosfera da Terra, sendo considerado que a Terra absorve apenas cerca de 70 por cento da irradiância solar total (IST), e o restante é refletido para o espaço. Os pesquisadores afirmaram que o IST não permanece constante, mas varia ligeiramente com manchas solares e atividades da atmosfera solar. Em particular, analisando os dados do satélite, os cientistas confirmaram uma relação entre a produção de energia solar e o ciclo solar de 11 anos, o qual, os cientistas conhecem desde Galileu.

A Figura 2.1 apresenta o gráfico da energia total emitida pelo sol, que varia em um ciclo de 11 anos. Até mesmo grandes variações ocorrem em pequenas escalas de tempo como grupos de manchas solares que se formam e se dissipam. Em escalas de tempo maiores o Sol pode seguir outros ciclos. O monitoramento dessas mudanças no Sol é feito para que os cientistas entendam melhor o papel do Sol nas mudanças climáticas na Terra.

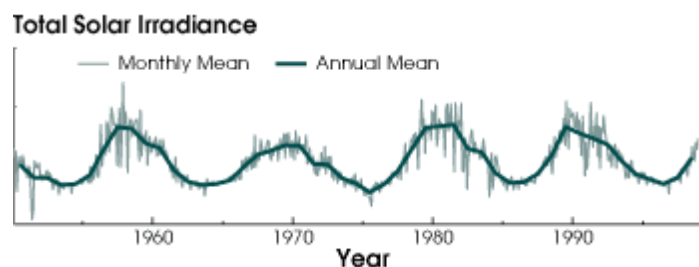


Figura 2.1 – Gráfico da radiação solar relacionada com o ciclo dos 11 anos do sol em todo o mundo. (Gráfico adaptado de Goddard Institute for Space Studies Data and Images: Solar Irradiance)

Fonte: NASA, 2011

A irradiância solar que incide na superfície da Terra dependerá de todos esses fatores, além de outros associados à interação da radiação eletromagnética com os constituintes da atmosfera da Terra. A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera é definida como transmitância atmosférica. Ao atravessar a atmosfera, a radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas (denominados

aerossóis) e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação e das espécies de gases e aerossóis presentes na atmosfera (MARTINS et al., 2004 p.147). A Figura 2.2 apresenta um diagrama com os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica na atmosfera.

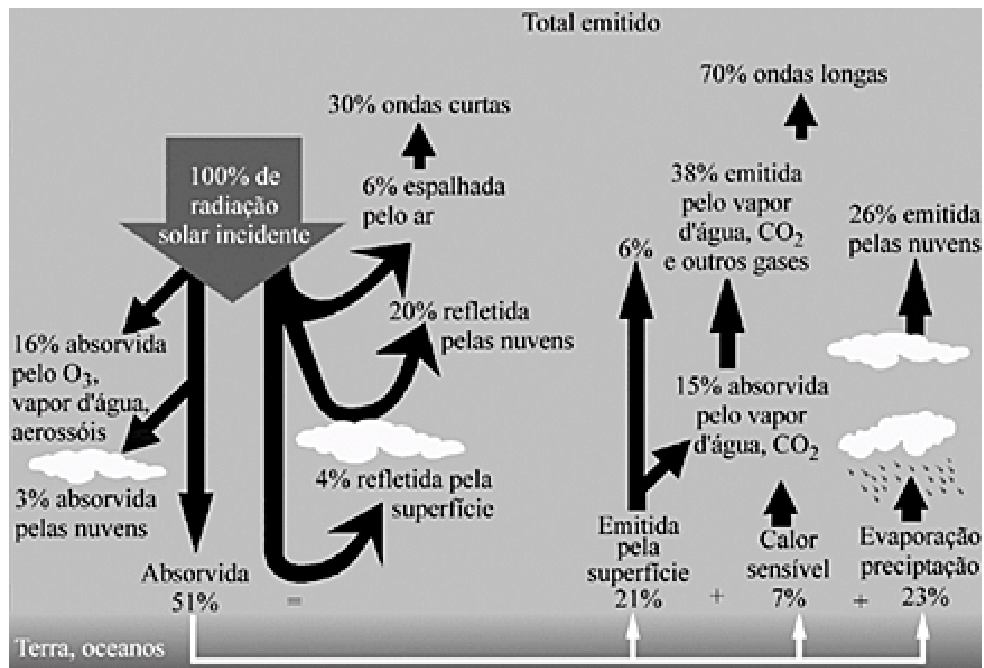


Figura 2.2 – Diagrama esquemático dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

Fonte: Harrison et al., 1993

A Figura 2.3 apresenta resumidamente as diversas formas com que a irradiância solar se apresenta na superfície terrestre. A radiação solar global é a somatória das parcelas direta e difusa da irradiância solar. A parcela direta é a que atinge diretamente a terra diretamente ela é atenuada pela transmitância da atmosfera e a difusa é a parcela que sofre um espalhamento pelas nuvens e pelas partículas da atmosfera, sendo refletida na abobada celeste e nas nuvens e reirradiada para a terra.

As nuvens, os gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da irradiância incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água ou convecção. A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa

do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética, entre - 4 a 100 μ m sendo que 6% é proveniente da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES, 2006).

Robinson (1966) classifica e enumera os diversos fatores que influenciam a intensidade da radiação incidente sobre determinado plano, de acordo com a Tabela 2.1.

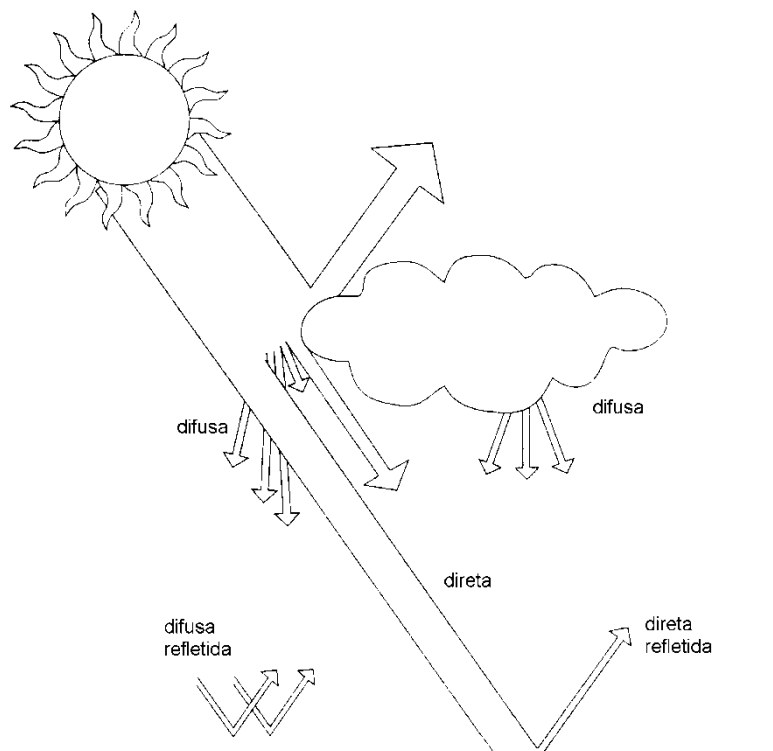


Figura 2.3 – Formas da radiação solar na superfície terrestre.

Fonte: Yannas (sd).

A energia irradiada pelo sol tem uma característica espectral, ou seja, chega com diferentes intensidades de acordo com o comprimento de onda da radiação emitida. A maior parte da energia irradiada pelo sol encontra-se na faixa do espectro que vai de 0,3 μ m, que efetivamente será transformada em calor pelos coletores solares. A figura 2.4 mostra as diferentes faixas do espectro da radiação.

Tabela 2.1 – Fatores que afetam a intensidade da radiação em uma superfície

Tipo de Fator	Fatores
Astronômico	O espectro solar entre $0,30\mu$ e $5,0\mu$ e a magnitude da constante solar Distância terra-sol Declinação solar Ângulo horário
Geográfico	Latitude do local Longitude do local
Geométrico	Altitude do local Altitude do sol Azimute do sol Inclinação da superfície Azimute da superfície
Físicos	Absorção pela atmosfera Conteúdo de água na atmosfera Coeficiente de turbidez O expoente α na fórmula de turbidez de Angström-Schüepp. Conteúdo de ozônio na atmosfera.
Meteorológico	Nuvens no céu Albedo dos arredores

Fonte: Robinson, 1966

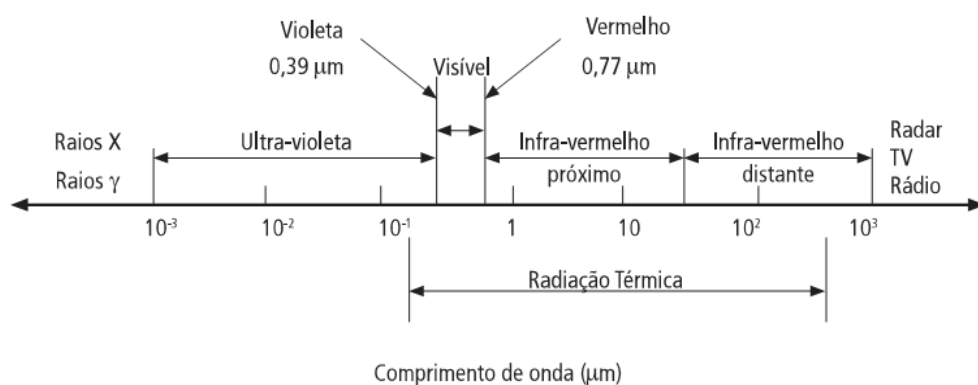


Figura 2.4 – Diferentes faixas do espectro de radiação de acordo com o comprimento de onda

Fonte: Lamberts et. al., 2010.

2.1.1 O aproveitamento da energia solar

O maior desafio para o projetista de sistemas de aproveitamento de energia solar consiste no estudo e previsão da irradiância solar, nos meios utilizados para capturar essa energia e na forma de armazenamento (ALDABÓ, 2002).

Segundo Pereira et al. (2006), no ABES, a média diária da irradiância solar, no plano horizontal, disponível no Brasil varia de 4,25kWh/m², por dia, em alguns locais da região sul até 6,5kWh/m² no interior da região nordeste. O aproveitamento dessa energia tem sido principalmente pelo uso de painéis fotovoltaicos e de aquecimento de água para o consumo, mas ainda é muito pequena a parcela de aproveitamento da energia solar, em contrapartida ao grande potencial existente no país.

A quantidade de energia incidente sobre uma superfície plana de um metro quadrado, no período de um dia não é muito quando comparado com a intensidade de outras fontes conhecidas de energia, dessa forma, o sistema de energia solar necessita de coletores espalhados por uma grande área para que seu rendimento seja razoável (ALDABÓ, 2002).

O cenário energético para a demanda de energia mundial nos próximos 50 anos, conforme estudos realizados pelo United Nations Solar Energy Group for Environment and Development (UNSEGED) e apresentado na Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento e Meio Ambiente, realizada no Rio de Janeiro em 1992, é apresentado através do gráfico da Figura 2.5 (ALDABÓ, 2002).

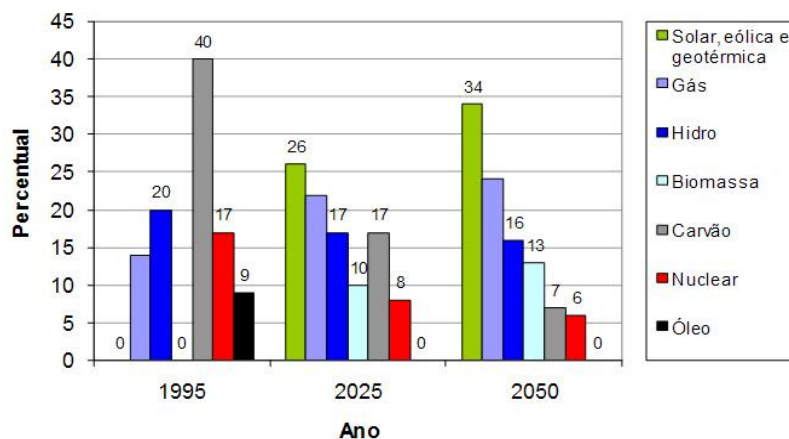


Figura 2.5 – Gráfico do ano de 1995, 2025 e 2050: Geração de energia mundial por ano.

Fonte: Adaptado de Aldabó, 2002.

Na Figura 2.5, é possível verificar que as formas de energia renovável e geotérmica são as que terão maior crescimento na produção. A demanda de energia global será o dobro em 2025 e o triplo em 2050, em relação ao ano de 1985. A participação da energia renovável na demanda global saltará de 21% em 1985, basicamente hidrelétrica, para 54% em 2025 para energia hidrelétrica, solar, eólica e biomassa (ALDABÓ, 2002).

A participação das energias solar e eólica será superior a 30% na demanda global em 2050. Nos países desenvolvidos, a energia nuclear será abolida aos poucos. Como exemplo, a Alemanha abandonará o uso da energia nuclear a partir de 2021 quando, a princípio, será fechada a última das 19 usinas nucleares (ALDABÓ, 2002).

2.1.2 O aproveitamento da energia solar no Brasil

Com cerca de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, mais de 7 mil quilômetros de litoral, o Brasil possui um dos maiores e melhores potenciais energéticos do mundo. Apenas duas fontes energéticas – hidráulica e petróleo – têm sido extensivamente aproveitadas (SAUER, 2002). Cerca de 76% do suprimento de energia elétrica do país provém de geração hidráulica (GOLDENBERG, 2002).

Segundo Kastrup (2006, p.50), das fontes de energia renovável disponíveis atualmente no mundo, a que melhor se adapta ao Brasil como fonte primária é a solar, devido à situação privilegiada do país em relação à incidência de raios solares.

O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial de energia solar durante todo o ano, segundo Tiba (2000). A utilização da energia solar poderia trazer benefícios em longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas, regulando a oferta de energia em situações de estiagem e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera como estabelece o Protocolo de Kyoto (PEREIRA, 1997).

A tecnologia do aquecedor solar já vem sendo usada no Brasil desde a década de 1960, época em que surgiram as primeiras pesquisas, sendo que em 1973 empresas passaram a utilizá-la comercialmente (ABRAVA, 2001). O mercado

brasileiro de aquecimento solar teve seu crescimento em números consideráveis nos meados da década de 1970 com a crise do petróleo.

Segundo Gavronski (2006), aproximadamente 15% da população brasileira não possui acesso à energia elétrica. Esta parcela da população vive em regiões onde o atendimento por meio da expansão do sistema elétrico convencional é economicamente inviável. Nesses casos o uso de energia solar seria o mais indicado para atender essa população que está fora do alcance das redes de distribuição de energia elétrica convencional.

O aquecimento solar será uma das principais tecnologias renováveis no Brasil nos próximos anos, contribuindo assim com a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), que estabelece meta de redução voluntária entre 36,1% e 38,9% na emissão brasileira de gases de efeito estufa até 2020. A iniciativa envolve o ProCobre – Instituto Brasileiro do Cobre, a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (Abrava), a Agência de Cooperação Técnica Alemã – *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ), a *Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership* (REEEP) e o Instituto Ekos Brasil.

Segundo o REN21, o Relatório Global de Energia Renováveis de 2010, o Brasil já é o quarto maior mercado de aquecedores solares do mundo, ficando atrás da China, Turquia e Alemanha. A título de comparação, segundo as estatísticas publicadas pela Associação da Indústria Solar Alemã (BSW-Solar), foram instaladas, em 2010, 1,15 milhões de metros quadrados de coletores solares na Alemanha, sendo que quase 50% das novas instalações foram sistemas combinados para aquecimento de água e calefação. Com isto, o país acumula uma área de coletores de 14 milhões de metros quadrados.

A Figura 2.6 mostra a divisão do mercado de aquecimento solar brasileiro, com a região sudeste sendo o maior mercado, com 69%.

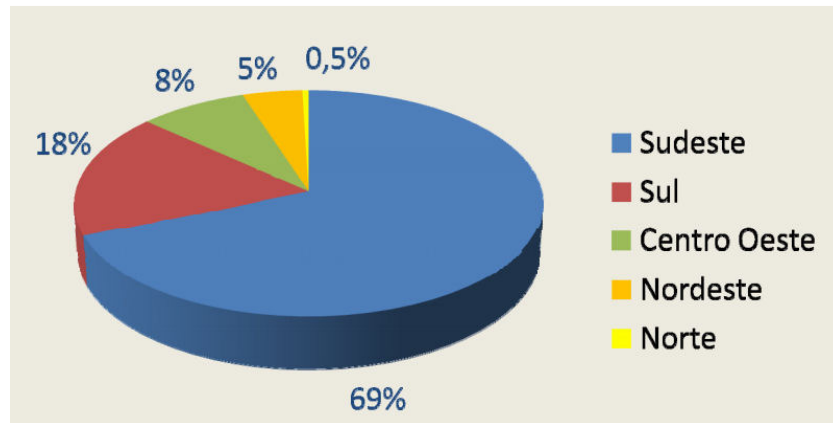


Figura 2.6 – O Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro.

Fonte: puc-minas - green-solar

No mundo existem diversos programas desenvolvidos, tais como, por exemplo, Plano Nacional de alterações climáticas (PNAC), Plano Nacional de ação para a eficiência energética (PNALE) e Plano Nacional de atribuições de licenças de emissão (PNAEE), que visam medidas concretas e até mesmo de caráter obrigatório, de modo a atingir as metas para sustentabilidade. Estes planos, inclusive o Protocolo de Kyoto em nível mundial, vão ao encontro de uma filosofia ambientalista que tem como objetivo a sensibilização da população para a redução da emissão de gases que causam o efeito estufa, racionalização da energia e desenvolvimento e implementação de sistemas que contribuam para estas alterações.

O Brasil lançou, em 2009, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA, que visa construir as bases necessárias para racionalizar o consumo de energia nas edificações no Brasil. As ações foram ampliadas e organizadas com o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz, ventilação etc.) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O consumo de energia elétrica nas edificações corresponde a cerca de 45% do consumo faturado no país. Estima-se um potencial de redução deste consumo em 50% para novas edificações e de 30% para aquelas que promoverem reformas que contemplem os conceitos de eficiência energética em edificações. Buscando o desenvolvimento e a difusão desses conceitos, o Procel Edifica vem trabalhando através de 6 vertentes de atuação: Capacitação, Tecnologia, Disseminação, Regulamentação, Habitação e Eficiência Energética e Planejamento.

2.1.3 Características do clima na região central do Rio grande do Sul

Segundo a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), o Brasil divide-se em oito zonas bioclimáticas, como mostra a Figura 2.7. Este zoneamento foi feito por meio de uma base de dados climáticos e tem por finalidade adequar às edificações ao clima melhorando seu desempenho térmico.

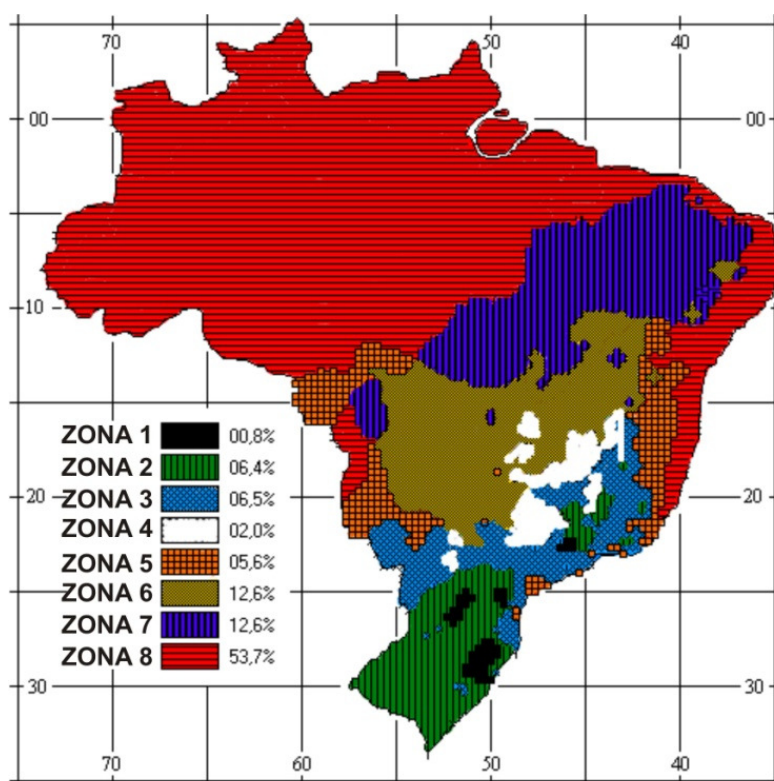


Figura 2.7 – Zoneamento bioclimático para o Brasil

Fonte: ABNT, 2005.

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi escolhida a cidade de Santa Maria – RS, que está inserida na zona bioclimática 2, com clima caracterizado por estações de verão e inverno bem definidas, marcado também pela sistemática entrada de frentes frias, grande amplitude térmica diária e altos índices de umidade, segundo a ABNT (2005).

Essa cidade é localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul,

conforme Figura 2.8, em uma área de 1.791,65 km², possui latitude de 29,68S e longitude 53,82O e se caracteriza por uma grande variação de altitude de 41 a 485m.

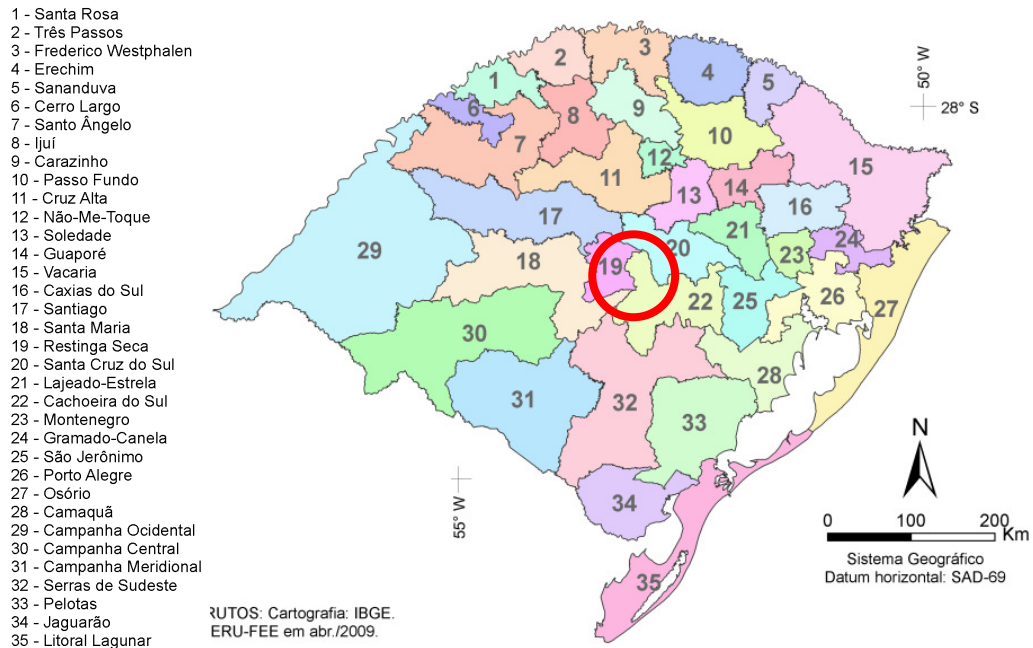


Figura 2.8 – Localização da cidade de Santa Maria - RS

Fonte: IBGE, 2009.

O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, juntamente com o INPE e LABSOLAR/UFSC, fornece dados climáticos de 20 cidades brasileiras, inclusive Santa Maria - RS. Estes dados são disponibilizados através de arquivos climáticos TMY (Typical Meteorological Year), e foram utilizados nessa pesquisa (SWERA, 2006)

A Tabela 2.2 apresenta os dados do dia típico de projeto para Santa Maria, RS, enquanto a Tabela 2.3 fornece dados de velocidade do vento e a Tabela 2.4 e o gráfico da Figura 2.9 fornecem os dados de radiação solar para a cidade de Santa Maria – RS.

Tabela 2.2 – Dia típico de projeto para Santa Maria – RS.

variável	inverno	verão
Máxima temperatura de bulbo seco (°C)	18.6	32.0
Amplitude térmica diária ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	9.8	10.5
Condições de Umidade indicadas Máxima do Bulbo Seco	9.4,	20.0
Pressão Barométrica (Pa)	100000	99804
Vento (m/s)	2.0	2.9
Direção do vento (deg)	90	140
Indicador de chuva	0	0
Dia do Mês	28	17
Mês	6	1
Dia da Semana	quarta-feira	quarta-feira

Fonte: SWERA, 2011.

Tabela 2.3 – Estatísticas mensais da velocidade do vento (m/s)

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Máximo	9.9	8.9	7.2	7.4	40.0	13.2	15.4	14.0	10.7	10.8	20.1	10.2
dia/hora	07:07	9:07	5:15	17:07	22:20	16:08	12:15	05:07	9:07	01:06	02:06	5:15
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
dia/hora	19:06	4:21	4:21	1:04	4:08	1:21	1:15	1:21	1:21	4:21	5:21	5:06
Média diária	2.4	2.0	2.0	2.1	2.3	2.2	2.4	2.5	3.0	2.7	3.6	2.1

Máxima velocidade do ar = 40.0 m/s Maio 22

Mínima velocidade do ar = 0.0 m/s Jan 19

Fonte: SWERA, 2011.

Tabela 2.4 – Radiação solar média para Santa Maria, RS (kWh/m²/dia)

Mês	Global	Direta	Difusa	Inclinada
Jan.	6.31	3.34	2.97	6.31
Fev.	5.56	2.92	2.62	5.53
Mar.	4.82	2.57	2.23	4.82
Abr.	3.56	1.78	1.92	3.54
Maio	2.9	1.63	1.42	2.9
Jun.	2.29	1,00	1.27	2.29
Jul.	2.51	1.20	1.35	2.51
Ago.	3.17	1.53	1.65	3.15
Set.	3.97	1.84	2.14	3.96
Out.	4.98	2.60	2.45	4.97
Nov.	6,0	3.10	2.87	5.98
Dez.	6.41	3.50	2.88	6.41

Fonte: RADIASOL, 2011.

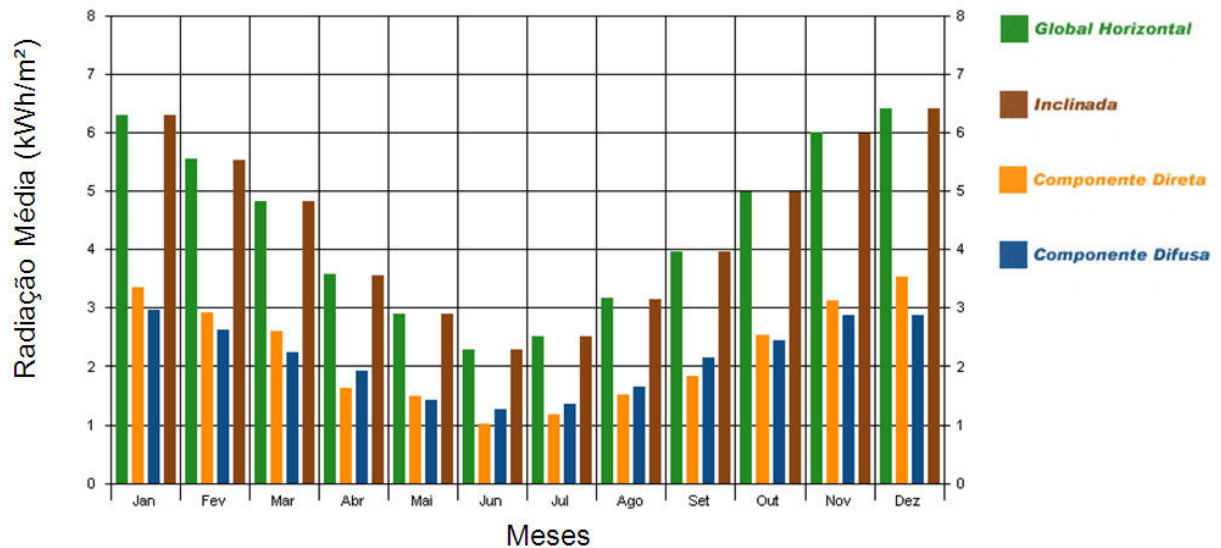


Figura 2.9 – Radiação Média (kWh/m²/mês) em uma superfície horizontal para a cidade de Santa Maria-RS

Fonte: RADIASOL, 2001.

2.2 Condições de conforto para a cidade de Santa Maria

As temperaturas consideradas de conforto para a parte interna das edificações são definidas pela HBR 16401 (ABNT, 2009). Para residências no período de verão, são consideradas confortáveis temperaturas entre 23 a 25°C, como mostra a Tabela 2.5, já para o inverno as temperaturas devem variar entre 20 a 22°C, como mostra a Tabela 2.6. Válidos para edificações condicionadas artificialmente.

Tabela 2.5– Condições internas para verão.

Finalidade	Local	Recomendável		Máxima	
		(A) TBS (°C)	(B) UR (%)	(A) TBS (°C)	(B) UR (%)
Conforto	Residências Hotéis Escritórios Escolas	23 a 25	40 a 60	26,5	65
Lojas de curto tempo de ocupação	Bancos Barbearias Cabeleireiros Lojas Magazines Supermercados	24 a 26	40 a 60	27	65
Ambientes com grandes cargas de calor latente e/ou sensível	Teatros Auditórios Templos Cinemas Bares Lanchonetes Restaurantes Bibliotecas Estúdios de TV	24 a 26	40 a 65	27	65
Locais de reuniões com movimento	Boates Salões de baile	24 a 26	40 a 65	27	65
Ambientes de Arte	Depósitos de livros, manuscritos, obras raras	21 a 23 ^(C)	40 a 50 ^(C)	-	-
	Museus e galerias de arte	21 a 23 ^(C)	50 a 55 ^(C)	-	-
Acesso	Halls de elevadores	-	-	28	70

^(A) TBS = temperatura de bulbo seco (°C).

^(B) UR = umidade relativa (%).

^(C) * = condições constantes para o ano inteiro.

Fonte: HBR 16401 (ABNT, 2009).

Tabela 2.6 – Condições internas para inverno.

TBS(°C)	UR (%)
20 - 22	35 - 65

Fonte: HBR 16401 (ABNT, 2009).

2.3 Disponibilidade de energia solar no Brasil

No Brasil, entre os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de irradiância solar, destacam-se os seguintes:

Atlas de Irradiação Solar do Brasil: elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR-UFSC), em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);

Atlas Solarimétrico do Brasil: iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB;

Atlas Brasileiro de Energia Solar: faz parte do projeto SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment, financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e pelo Fundo Global para o Meio Ambiente. O projeto foi iniciado em 2001 e envolveu o INPE e o LABSOLAR-UFSC.

A Figura 2.10 mostra o mapa de irradiância global média anual e sua variabilidade mensal contido no "Atlas de Irradiação Solar do Brasil".

MÉDIA ANUAL TÍPICA

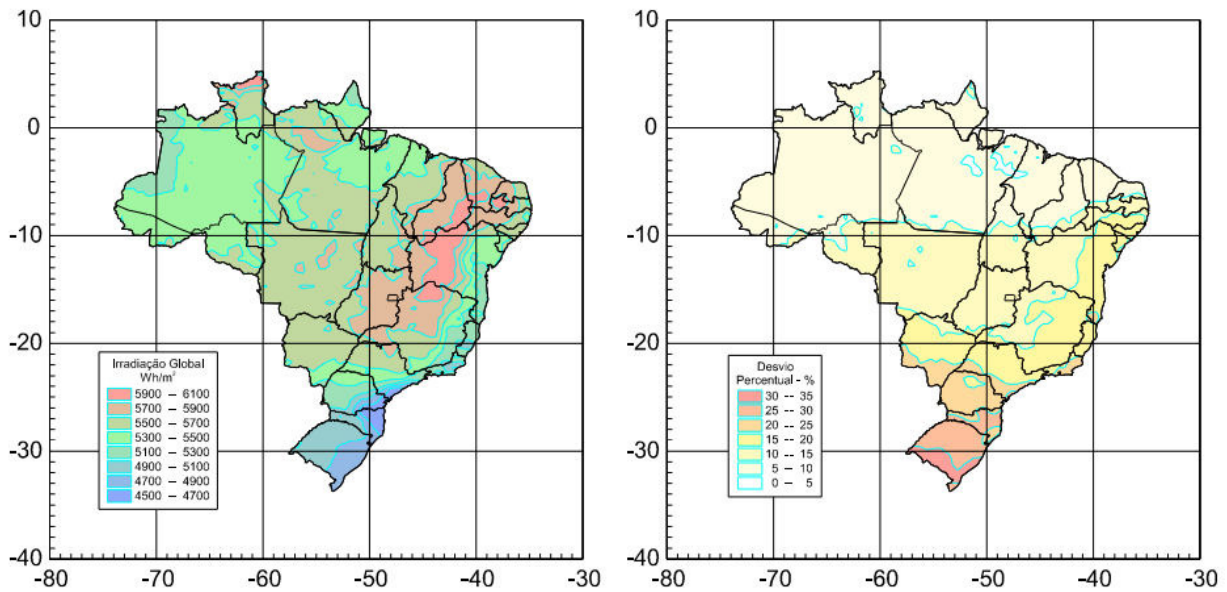


Figura 2.10 – Irradiação média anual e a variabilidade mensal da irradiação anual.

Fonte: Pereira, 1998.

Nos gráficos da figura 2.11 é possível verificar a média mensal e a variabilidade da irradiância média diária para a região sul do Brasil e comparar estes dados com os mesmos dados, de todo o território nacional.

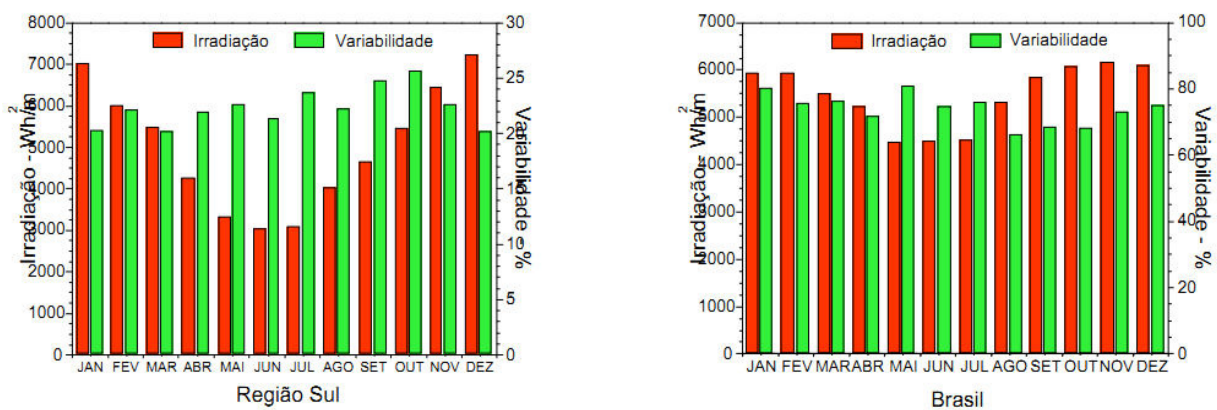


Figura 2.11 – Gráficos comparativos entre a irradiação média mensal e a variabilidade da irradiação média diária para a região sul e para todo o Brasil.

Fonte: Pereira, 1998.

A base de dados do Atlas Solarimétrico do Brasil, Figura 2.12, publicado por Tiba (2000), disponibiliza valores históricos de medidas de horas de insolação e irradiância solar global, direta e difusa em localidades espalhadas por todo o território brasileiro. A publicação apresenta também mapas de isolinhas de horas de insolação e radiação solar global preparados por técnicas de extrapolação dos valores contidos nessa base de dados.

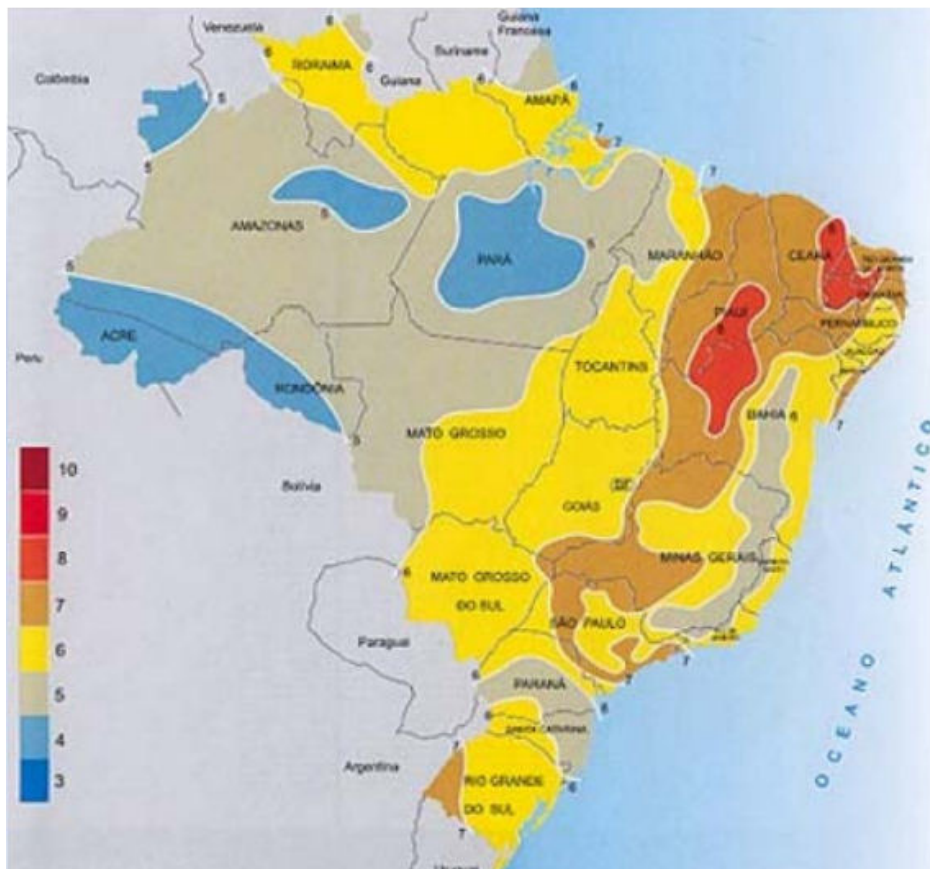


Figura 2.12 – Insolação diária, Média Anual (horas)

Fonte: TIBA, 2000.

Segundo dados do Atlas Solarimétrico, o Brasil tem 2.200 horas de insolação, assim tendo potencial de 15 trilhões de MWh, que é equivalente a 50 mil vezes o consumo nacional de eletricidade.

Posteriormente, Pereira et al. (2006) desenvolveram o projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), que mapeou o potencial solar e eólico do território brasileiro e de outros 15 países e que aponta para grandes potenciais

solares e eólicos espalhados por todo o país, é um passo para reverter o quadro de sub-aproveitamento de energia atual.

Na Figura 2.13, podemos visualizar o potencial anual médio de energia solar para o período de 10 anos em que este estudo do Atlas Brasileiro de Energia Solar se baseia. As regiões mais ao norte do país apresentam a maior disponibilidade energética (Pereira et al, 2006).

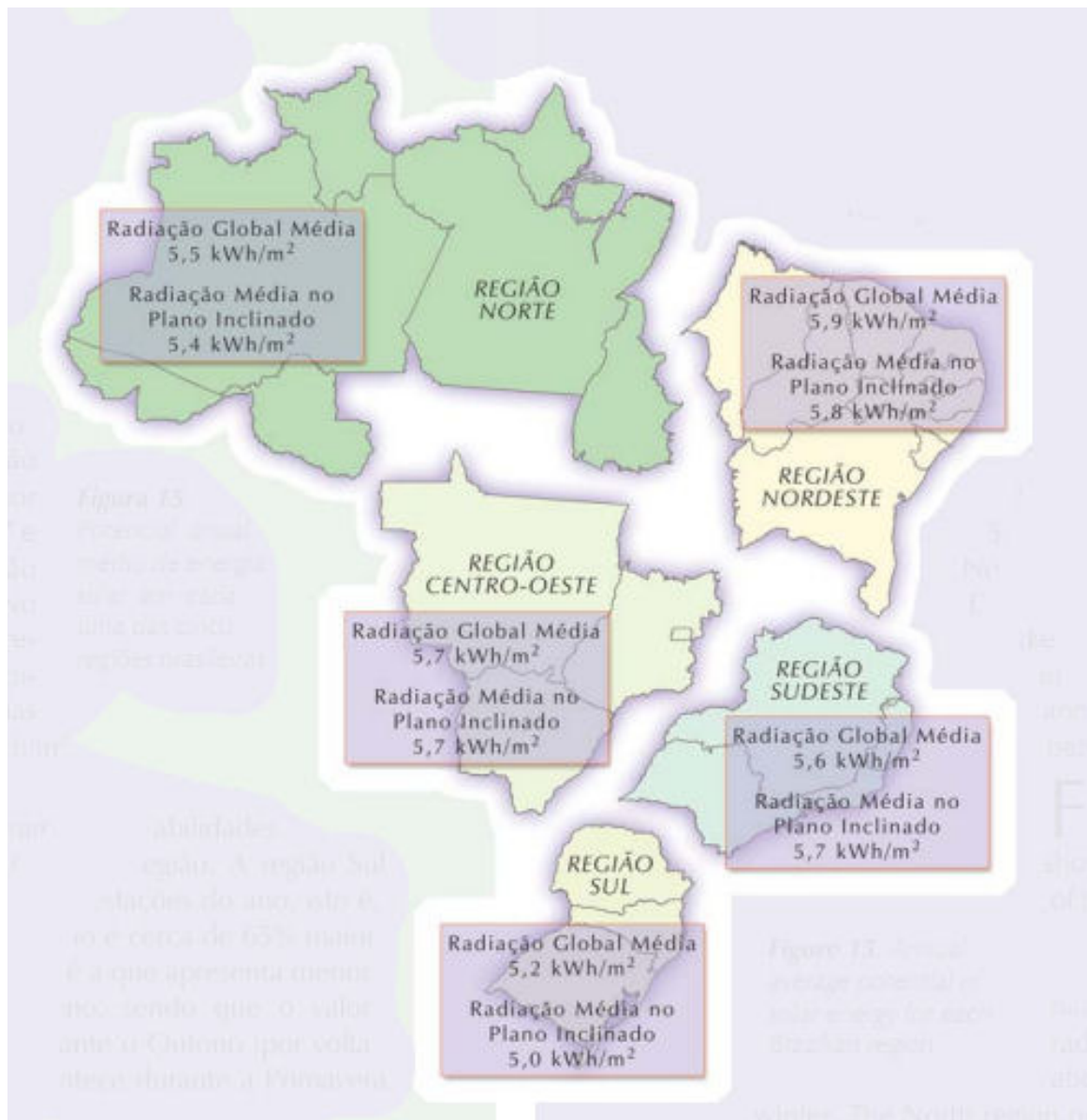


Figura 2.13 – Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras.

Fonte: Pereira et al., 2006.

2.4 Formas de utilização da radiação solar em edificações

A radiação solar é o principal fator de ganho térmico em uma habitação. Ao se observar a arquitetura vernacular, se percebe que, desde a antiguidade, o homem procura criar tipologias construtivas para aproveitar ou evitar essa forma de energia. Ferraro et al. (2001) sustenta a idéia de que a captação passiva é o processo mais antigo e rudimentar de uso da energia solar de que se tem conhecimento. Como exemplo dessas estratégias, podemos citar o povo Mesa Verde (no deserto do Colorado, Estados Unidos) que construiu suas habitações nas encostas de pedra, de forma a obter sombreamento no verão. No inverno, devido à inclinação mais baixa do sol os raios solares batem nas habitações e na encosta de pedra, aquecendo-as durante o dia, durante a noite a energia obtida por massa térmica é liberada, amenizando a queda brusca de temperatura, comum em áreas de deserto, assim como demonstra a Figura 2.14.



Figura 2.14 – Potencial anual médio de energia solar em cada uma das cinco regiões brasileiras.

Dioffo (1976) descreve as várias áreas de utilização da energia solar, sendo esta suscetível a diversas formas de aproveitamento, como em utilizações puramente térmicas (aquecedores de água, destiladores, fogões solares); conversão termodinâmica (motor, turbina e refrigeração solares) e conversão direta em

eletricidade (painéis solares fotovoltaicos).

Pereira et al (2003) separa as aplicações práticas da energia solar térmica em dois grupos, energia solar ativa e energia solar passiva, conforme Figura 2.15.

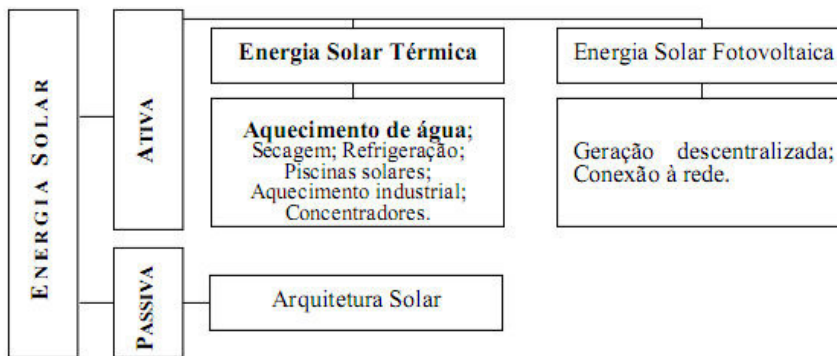


Figura 2.15 – Fluxograma das aplicações práticas da energia solar.

Fonte: Pereira et al., 2003.

Concordando com Pereira, os sistemas solares para aquecimento de ambientes segundo Hinrichs e Kleinbach (2003, p.123), são divididos em passivos e ativos, sendo que as características gerais para o sistema podem ser observadas na Figura 2.16.

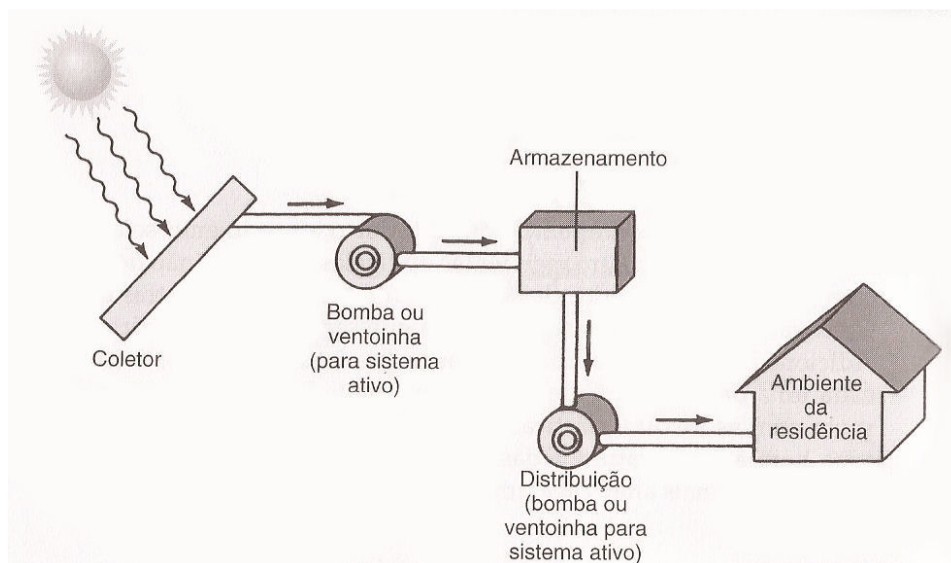


Figura 2.16 – Características gerais de um sistema solar de aquecimento (ativo ou passivo)

Fonte: Hinrichs e Kleinbach, 2003.

Um sistema solar ativo é aquele no qual o fluido que o sol aqueceu é circulado por um ventilador ou por uma bomba. Para o aquecimento solar passivo de ambientes, a própria edificação pode funcionar como coletor solar e estrutura de armazenamento de calor. O fluxo de energia térmica ocorre por meios naturais, nenhum tipo de equipamento mecânico, como bombas e ventoinhas, é utilizado.

O sistema passivo faz uso do fato de que a quantidade de energia solar transmitida através das janelas durante um dia claro é maior que o calor perdido através delas durante um período de 24 horas. Para se reduzir os efeitos do superaquecimento e armazenar a energia solar que entra, os sistemas passivos fazem uso dos materiais da própria construção. Alguns objetos têm a capacidade de absorver grandes quantidades de energia térmica. Esses objetos são feitos de materiais como concreto, água e pedras e são chamados de massa térmica. Os elementos essenciais de um sistema solar passivo são: um excelente isolamento térmico, a coleta de energia solar e elementos de armazenamento térmico.

Para Brinkworth (1982), um dos métodos diretos mais interessantes para a utilização de energia solar é a calefação de edifícios situados em locais de climas frios ou a produção de água quente para residências, colégios, fábricas hospitais etc.

São apresentas a seguir algumas formas de aproveitamento da radiação solar nos edifícios, como a calefação, o aquecimento solar passivo e sistemas de aquecimento de água com energia solar.

2.4.1 Aquecimento de ambientes - calefação

A calefação é o sistema de aquecimento em recintos fechados, muito utilizado em locais de clima temperado e frio. Há muito tempo utilizado, desde que os homens das cavernas incendiavam madeira, aquecendo o ar no interior do recinto.

Durante o auge do Império Romano o sistema evoluiu. As pessoas passaram a utilizar dutos com água quente, que espalhavam o ar aquecido por toda a habitação, sendo necessário ter o fogo em apenas um lugar, e não em cada cômodo. Processo conhecido como calefação central.

Existem diversas formas de aquecimento para edificações, que são divididas

em diretas e indiretas. As formas de calefação direta são lareiras, estufas elétricas ou a combustão, caldeiras a tubo de ar entre outros. O aquecimento por forma indireta é feito com o uso de um fluido intermediário geralmente água, vapor de água e ar aquecido. Como exemplo pode-se citar a calefação feita por meio de radiadores de água quente ou vapor ou o uso de “bombas de calor” que é um sistema semelhante ao usado para a refrigeração, porém em ciclo reverso.

Segundo Costa (1982), a calefação solar consiste no aquecimento das habitações por meio do calor do sol. Para isso adotam-se basicamente dois sistemas: calefação por meio de ar quente, conforme a Figura 2.17, e calefação por meio de água quente, conforme a Figura 2.18.

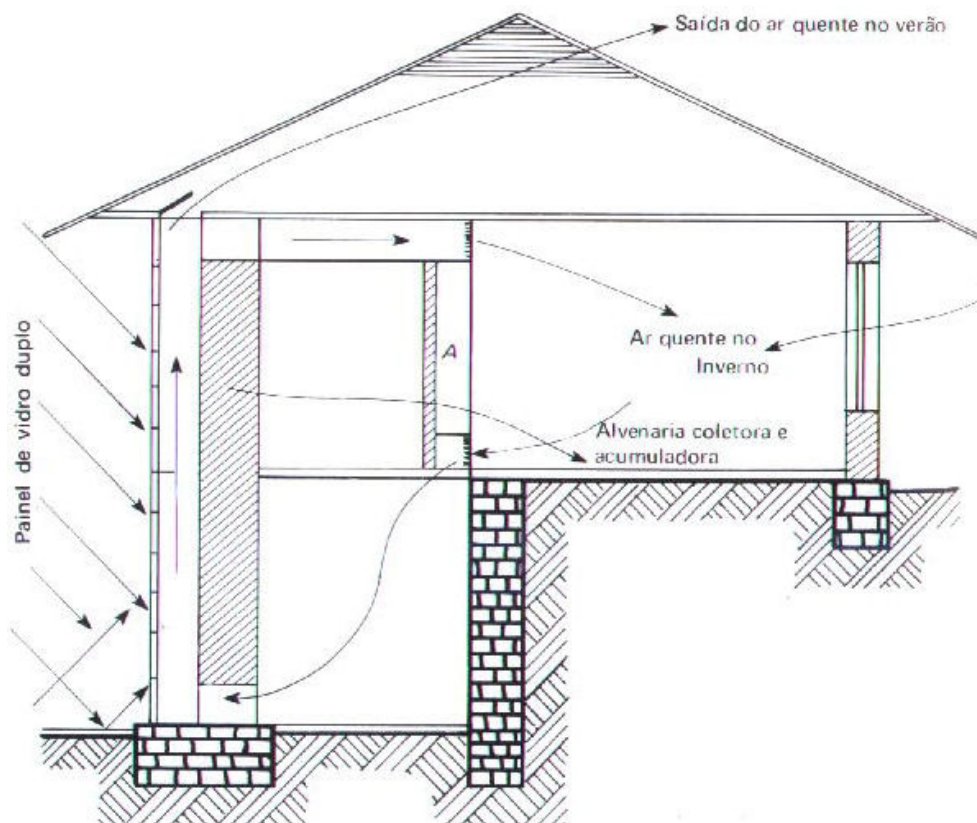


Figura 2.17 – Calefação solar por meio de ar.

Fonte: Costa, 1982.

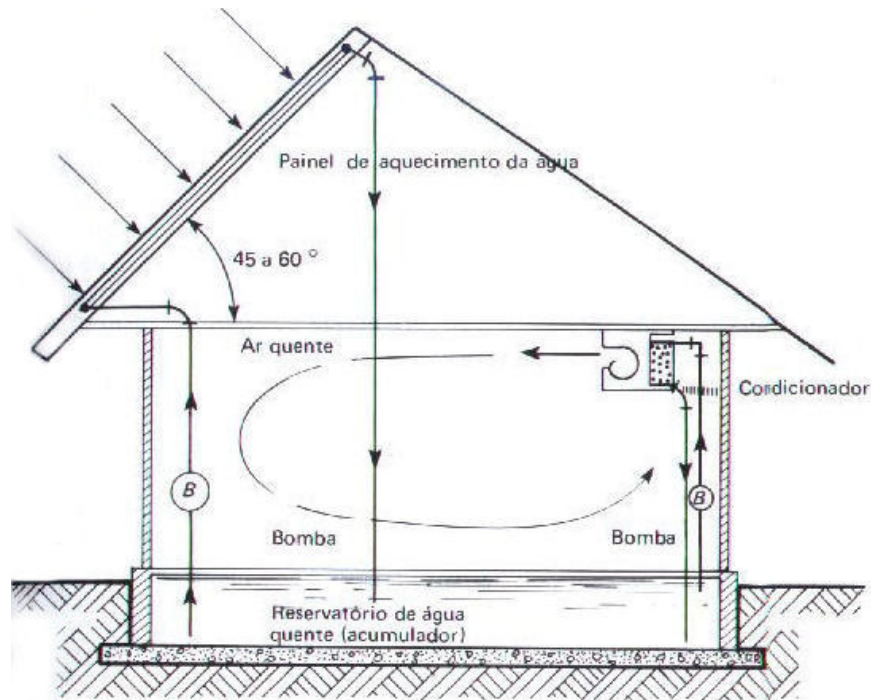


Figura 2.18– Calefação solar por meio de água.

Fonte: Costa, 1982.

De acordo com Costa (1982), o cálculo de área de painéis coletores de energia para o aquecimento de uma edificação é proporcional a metragem quadrada da mesma, sendo necessário também a acumulação de calor para atender à calefação nos dias sem sol. Essa acumulação é feita usando acumuladores térmicos, com materiais de boa capacidade de armazenamento térmico.

A calefação por meio de ar quente consiste na utilização do ar aquecido como agente transportador do calor. Essa circulação do ar pode ser feita de maneira natural ou forçada. O aquecimento do ar pode ser feito de formas diversas como resistências elétricas, água quente, bomba de calor ou energia solar (COSTA,1982).

A Figura 2.19 apresenta o sistema de aquecimento central por meio de ar quente, com circulação forçada, o qual permite o controle de temperatura e a filtragem e controle de umidade do ar. O ar aquecido do ambiente é reaproveitado depois de passar pelo filtro diferentemente do que acontece nas instalações de ventilação pura, onde o ar é totalmente renovado e o calor é perdido (COSTA,1982).

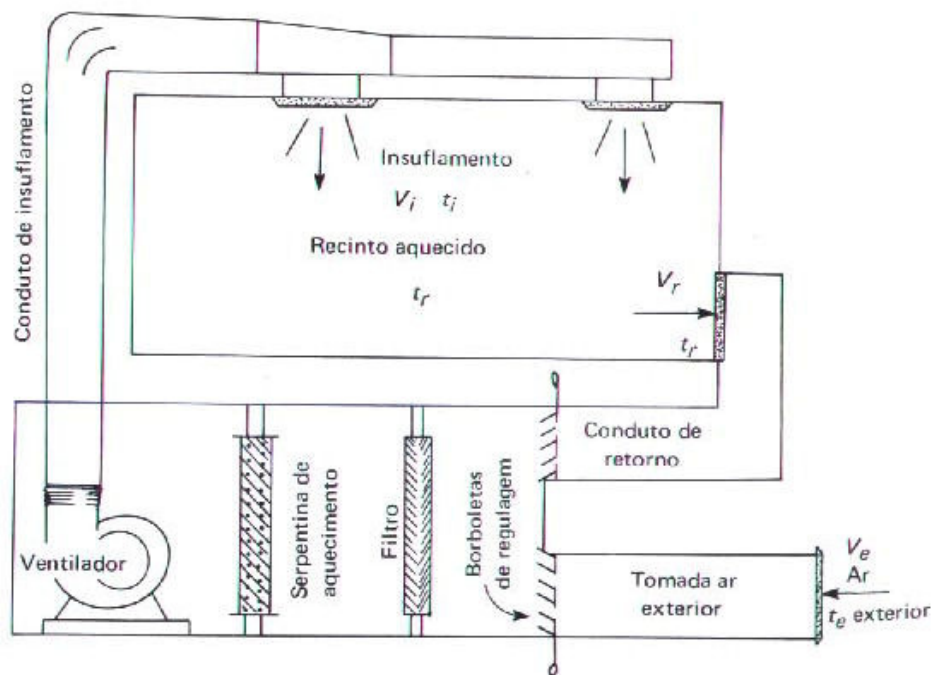


Figura 2.19 – Calefação por meio de ar quente.

Fonte: Costa, 1982.

Como exemplo de sistema para aquecimento de ambientes que utiliza energia solar, podemos citar a Casa Eficiente, projeto elaborado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina, com apoio das Centrais Elétricas S.A. (ELETROSUL) e das Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS).

O sistema é composto por coletores solares planos de $1,4\text{m}^2$ e um reservatório térmico horizontal de 200 litros, com aquecimento auxiliar interno feito por uma resistência elétrica de 1.500W . Funciona por circulação forçada, visto que as placas coletoras situam-se acima do nível do reservatório térmico.

As Figuras 2.20 e 2.21 mostram respectivamente as placas coletoras instaladas nos telhados laterais da Casa Eficiente e o reservatório térmico instalado.



Figura 2.20 – Detalhe das placas coletoras sobre o telhado na Casa Eficiente.

Fonte: Lamberts et al., 2010.



Figura 2.21 – Reservatório térmico usado na Casa Eficiente.

Fonte: Lamberts et al., 2010.

A Figura 2.22 apresenta, para esta casa, o sistema para aquecimento de ambientes, que possui dois circuitos independentes de circulação forçada de água quente. O primeiro circuito, acionado por um sistema de controle diferencial de temperatura, localiza-se entre o reservatório térmico e as placas coletoras e tem a função de absorver a energia solar. O segundo circuito leva água aquecida do reservatório térmico até os ambientes, circulando nos mesmos por uma tubulação próxima ao rodapé, que funciona como um aquecedor. A bomba de circulação desse sistema é acionada sempre que a temperatura nos quartos estiver abaixo do valor desejado (LAMBERTS et al., 2010).

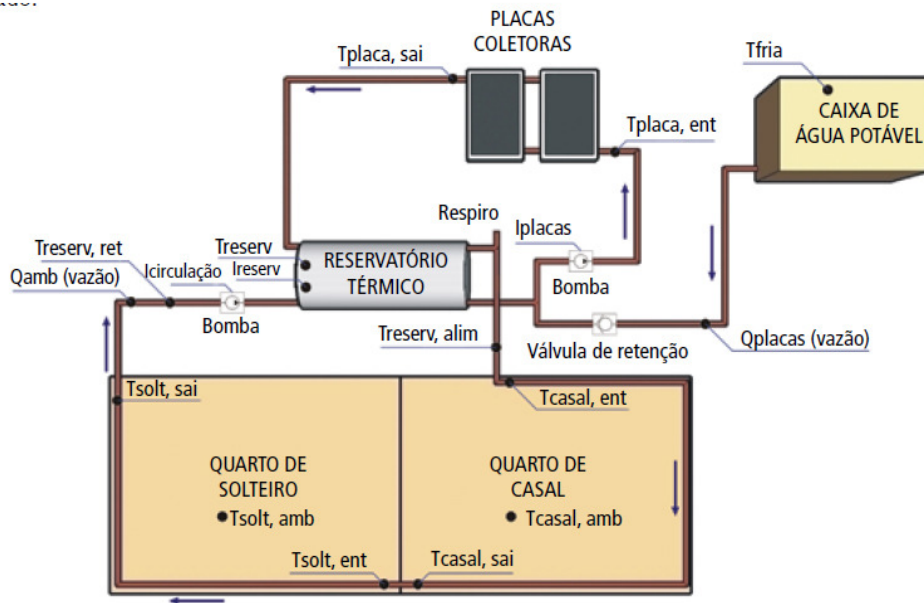


Figura 2.22 – Esquema de funcionamento de sistema de calefação de ambientes

Fonte: Lamberts et. al., 2010.

Podemos observar, na Figura 2.22, os dois circuitos independentes, entre reservatório térmico e placas coletoras e entre reservatório térmico e ambientes a serem aquecidos. O primeiro circuito funciona como um sistema de aquecimento de água de consumo normal. Já o segundo circuito possui um sensor de controle da temperatura interna em um dos ambientes, semelhante a um termostato, que liga a bomba de circulação sempre que a temperatura estiver abaixo do valor desejado e a desliga quando ela é alcançada.

2.4.2 Aquecimento solar passivo

O aquecimento solar passivo pode ser obtido utilizando-se diversas técnicas no projeto arquitetônico. A adequada orientação e cor dos fechamentos, o uso das aberturas zenitais controláveis, o emprego de painéis refletores externos, a parede trombe, os coletores de calor no telhado, a estufa e os coletores de calor de água ou óleo são alguns exemplos de como a energia solar pode ser aproveitada de forma passiva. Segundo Roaf (2009), há três componentes-chave a todos os sistemas solares passivos: coletor, massa térmica (termoacumulador) e espaço aquecido.

Ainda segundo a mesma autora os processos típicos envolvem:

- coleta – Para coletar energia solar, janelas duplas são usadas nas fachadas norte das casas (hemisfério sul).
- armazenagem – depois que a energia do sol foi coletada, um pouco de calor é usado imediatamente nos espaços da casa e outro tanto é armazenado para uso posterior. O elemento de armazenagem, chamado de massa térmica ou termo acumulador, é geralmente incorporado aos pisos e/ou paredes internas. A massa é caracterizada pela capacidade de absorver calor, armazená-lo e liberá-lo lentamente à medida que a temperatura dentro da casa cai. Concreto, pedra, tijolo e água podem ser usados como massa térmica.
- distribuição – o calor armazenado nos pisos e paredes é lentamente liberado por radiação, convecção e condução. Em um sistema híbrido, ventiladores, tomadas de ar e sopradores podem ser usados para distribuir o calor.

Os sistemas de ganho direto são os mais comuns na arquitetura solar passiva (ROAF 2009). Nas configurações de ganho direto os raios solares entram na edificação através de janelas e aberturas zenitais incidindo em materiais pesados como concreto e pedra. Esses materiais recebem calor durante o dia e pelo retardo na liberação dessa energia ajudam a reduzir as variações da temperatura, assim, essa energia é liberada aos poucos durante o período no qual não recebe radiação solar. Segundo Roaf (2009), embora a massa que é diretamente atingida pela energia incidente, seja a mais efetiva para a armazenagem de energia, as trocas de radiação de ondas longas e as correntes convectivas de ar nos cômodos aquecidos pelo sol permitem que as massas não atingidas também forneçam armazenagem eficiente da energia.

O ganho térmico direto é bastante eficiente e pode se dar pela permissão de acesso dos raios solares dentro da edificação por aberturas, como janelas, paredes transparentes e aberturas zenitais. Quando os raios solares atravessam um elemento transparente ao entrar na edificação, acaba gerando o efeito estufa.

Segundo McCluney (1993), o efeito estufa é o maior efeito transformador da radiação solar em calor no interior das edificações. A radiação solar de onda curta que entra por uma abertura no edifício incide nos corpos que se aquecem e emitem radiação de onda longa. O vidro é opaco a esses comprimentos de onda, que se

situam na faixa dos raios infravermelhos longos. Dessa forma, o calor não encontra passagem para o exterior, superaquecendo o ambiente interno.

Na mesma linha das ideias de McCluney (1993) estão os conceitos de Olgyay (1963) que também considera a radiação solar como uma das mais importantes contribuintes naturais para o ganho térmico em edificações. Segundo esse autor, a ordem de importância da transferência de calor é: radiação solar direta de onda curta, radiação difusa de onda curta, radiação de onda curta refletida pelo solo do entorno, radiação de onda longa emitida pelo sol e por objetos próximos, e radiação de onda longa.

O armazenamento de calor solar nas paredes (massa térmica) foi determinado como eficaz e pertinente ao ambiente interno dentro do intervalo de temperaturas absolutas entre 15,5°C e 21,1°C, valores estes definidos através de experiências práticas, pelo *Los Alamos Scientific Laboratory* (LASL), relatados por Balcom et al. (1979).

Givoni e Milene (1979) salientam que edificações com parede de pouca massa resfriam-se rapidamente durante a noite, atingindo valores abaixo da zona de conforto, e recomendam que a solução para obter-se sucesso em um projeto de aquecimento solar passivo estaria em fazer com que raios do sol incidissem em paredes de alta massa, de forma que, após 12 horas, o estoque de calor armazenado pela massa das paredes seja devolvido para dentro da edificação no período noturno.

Este trabalho utiliza o sistema de ganho direto para o aquecimento do ático envidraçado do telhado e posterior distribuição nos ambientes da edificação. Os fechamentos do átrio são em concreto, sendo esta a massa térmica que armazenará o calor para dissipá-lo lentamente de acordo com a necessidade da edificação.

2.4.3 Sistemas de aquecimento de água com energia solar

O aquecimento solar de água para o consumo é uma importante estratégia para aumentar a eficiência energética nas edificações, além disso, esses sistemas diminuem o consumo no pico de demanda do sistema elétrico, reduzindo investimentos em sistemas de geração, transmissão e distribuição. Este capítulo tem

como objetivo mostrar o funcionamento desses sistemas que se tornam oportunos pela disponibilidade de níveis de irradiação solar e condições climáticas apropriadas para o aquecimento de água pelo sol que é uma fonte limpa renovável e ilimitada de energia.

O aquecimento da água é feito por painéis coletores que geralmente são posicionados na cobertura das edificações, pela facilidade em direcioná-los de forma a coincidir o ganho de energia solar à demanda por energia térmica para aquecimento de água. Segundo Lamberts et al (2010), no hemisfério Sul as superfícies que absorvem a maior quantidade de energia solar durante o ano inteiro são as voltadas para o Norte, com uma inclinação em relação com a horizontal igual à latitude local, porém é usual inclinar a placa um pouco mais para favorecer o ganho de energia solar durante os meses de inverno.

Fraidenraich (2002) cita que o coletor solar plano é conhecido como o equipamento mais popular da tecnologia solar. O uso de coletores solares para aquecimento de água pode ser muito importante para a redução de gastos de energia, pois, segundo o relatório da Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de uso ELETROBRAS e PROCEL (2007), 73% das residências brasileiras possuem chuveiro elétrico, equipamento responsável por, aproximadamente, 24% do consumo final da carga de energia elétrica residencial. O uso de aquecimento de água solar colabora com a diminuição do gasto de energia e diminui o pico de demanda, nos horários de banho, principalmente na região sul, que tem o consumo maior que a média brasileira, como pode ser visto nos gráficos das Figuras 2.23 e 2.24.

De acordo com a ABRAVA (2003), o mercado para aplicações da energia solar no aquecimento de água, no país, abrange residências unifamiliares, hospitais, hotéis, motéis, vestiários e restaurantes industriais, sendo também cada vez mais empregada no aquecimento de piscinas.

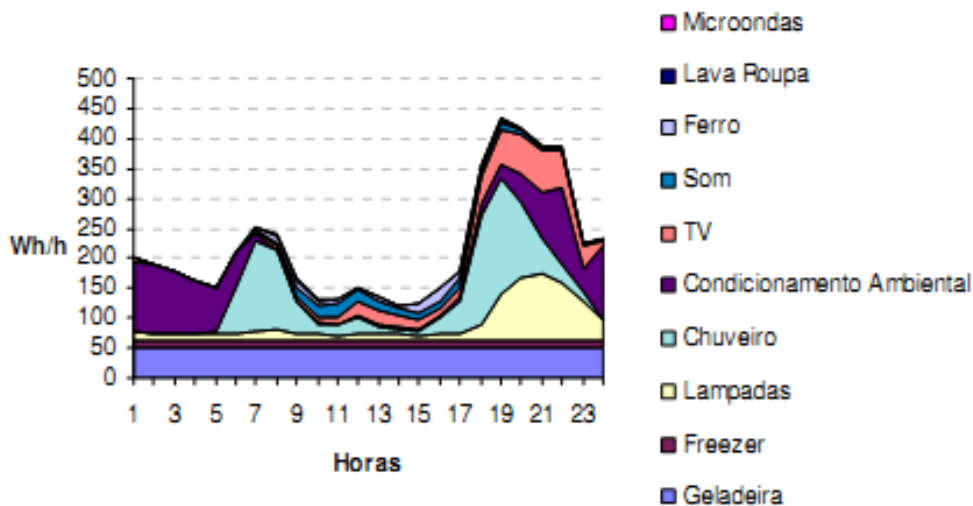


Figura 2.23 – Curva de carga diária média no Brasil.

Fonte: Pesquisa de Posse e Hábitos ano base 2005 - ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

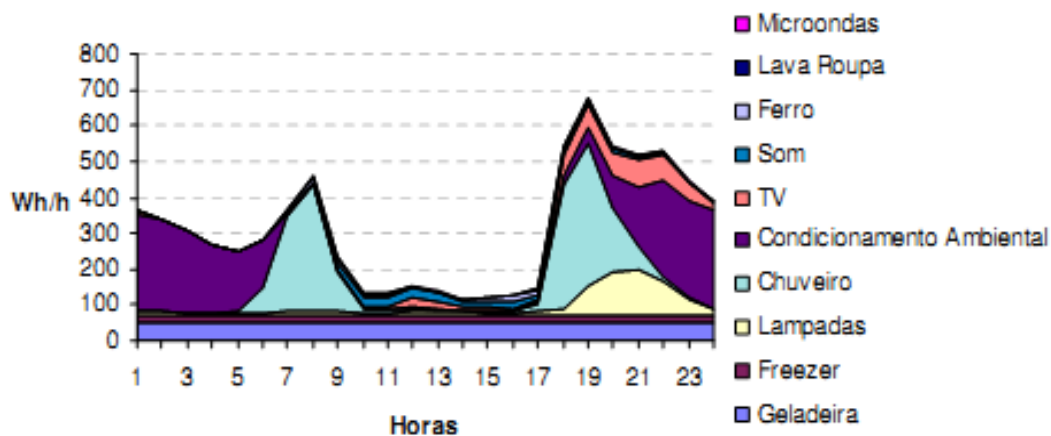


Figura 2.24 – Curva de carga diária média na região Sul.

Fonte: Pesquisa de Posse e Hábitos ano base 2005 - ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

De acordo com o gráfico da Figura 2.23, é possível observar que o uso de chuveiro elétrico é responsável por cerca de 8% da demanda de energia elétrica consumida no país, já no gráfico da figura 2.24 é possível visualizar a curva diária de gasto de energia na região sul do país, na qual o gasto com o chuveiro é ainda maior que a média nacional.

2.4.3.1 Componentes de um sistema de aquecimento de água com energia solar

De acordo com a NBR 15.569 (ABNT 2008), os sistemas solares são classificados conforme o arranjo, circulação, regime, armazenamento, alimentação e alívio de pressão. Os sistemas de aquecimento de água com energia solar são constituídos por coletores solares, reservatório térmico para água quente, aquecedor auxiliar e tubulações, como exemplifica a Figura 2.25.

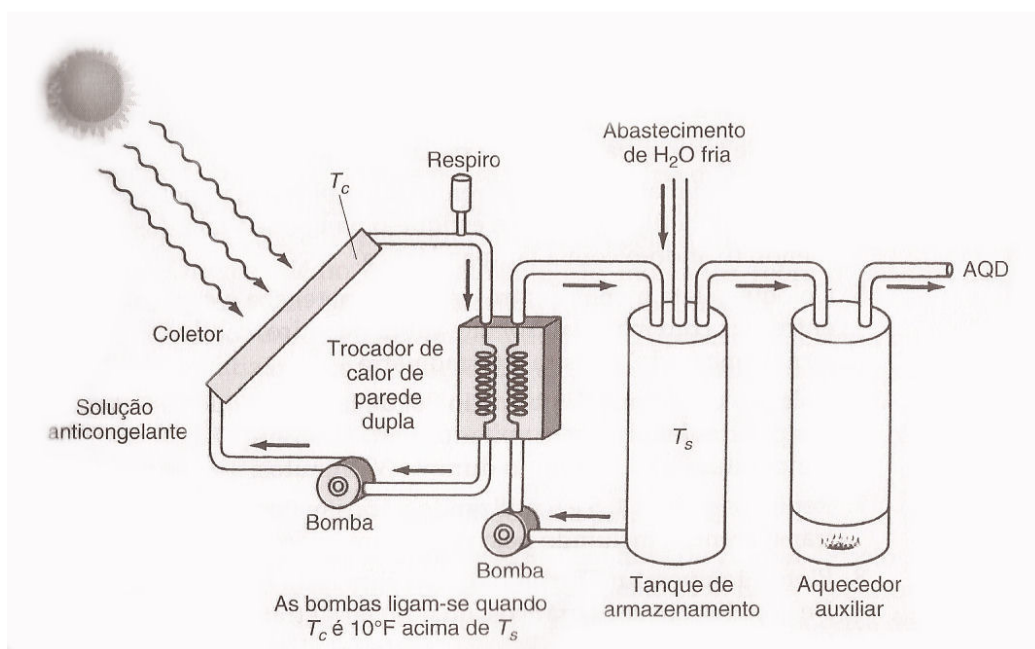


Figura 2.25 – Sistema solar doméstico de água quente

Fonte: Hinrichs e Kleinback, 2003.

Como os aquecedores solares são instalados tanto em edificações em fase de construção quanto em edificações já construídas, seria necessário prever, desde a fase inicial do projeto da edificação, a instalação de tubulações para água quente, para possibilitar a instalação do sistema de aquecimento solar sem maiores problemas técnicos e a custos menores (CEMIG, 1990).

Para um bom funcionamento e satisfação do uso do sistema de aquecedor solar é necessário o dimensionamento adequado de seus componentes, pois os resultados satisfatórios da tecnologia de aquecimento solar de água através de

coletores solares planos são obtidos quando os aquecedores são projetados, construídos e instalados de forma adequada.

São componentes de um sistema de aquecimento de água o painel solar, o reservatório térmico e o circuito termotransportador.

a) Painel coletor solar:

O painel coletor solar é o principal componente de um sistema de aquecimento solar térmico, esse equipamento é responsável pela captação da energia irradiada pelo Sol e a conversão desta energia em energia térmica. A transferência de energia ocorre entre uma fonte de energia radiante e um fluido. Esses coletores são classificados basicamente em: coletores de concentração, os de tubos evacuados, os coletores de placa plana fechados e os sem cobertura.

O coletor de concentração é utilizado para atingir temperaturas mais elevadas. Seu princípio de funcionamento é utilizar lentes ou espelhos para concentrar a luz solar sobre um elemento absorvedor que os permitem atingir temperaturas elevadas, de acordo com Salvadorette (1983). Estes coletores conseguem atingir temperaturas elevadas, pois concentram a energia proveniente do Sol no absorvedor de área reduzida, isto diminui as perdas térmicas. Este dispositivo é bastante caro e complexo.

Os coletores de tubo evacuado possuem tecnologia mais sofisticada, diferindo dos de placa plana pelo uso do vácuo como isolante térmico e, em alguns casos, tubos de calor para transferir o calor da placa coletora para o fluido, permitindo obter eficiências maiores a temperaturas mais altas.

O modo mais conhecido de aquecimento de água para consumo é por painéis de absorção planos, providos de feixes de tubos interligados a reservatórios de acumulação, por onde circula a água a ser aquecida (COSTA, 2004). São considerados equipamentos simples do ponto de vista de fabricação, converte a radiação solar em calor transferindo esta energia para a água. A placa absorvedora é a própria superfície que recebe radiação. Eles apresentam uma série de vantagens sobre os coletores de concentração, tais como: simplicidade de construção, o custo relativamente baixo, pouca manutenção e alta durabilidade.

A maior parte do aquecimento de água é realizada através de coletores solares planos fechados ou abertos. A escolha de um ou outro varia de acordo com a temperatura desejada. Os coletores utilizados para aquecer água a temperaturas em torno de 60°C são os chamados coletores solares fechados. Uma foto desse

coletor é mostrada na Figura 2.26. Enquanto os coletores abertos, apresentados na Figura 2.27, operarem com temperaturas variando entre 28 e 30°C.

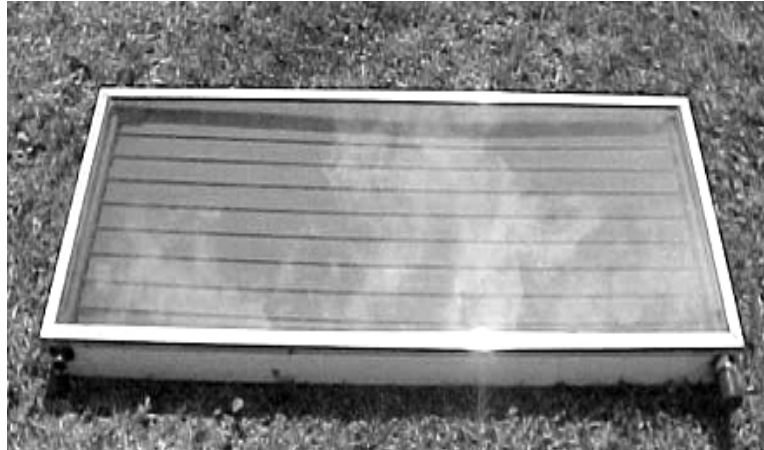


Figura 2.26 – Coletor solar plano fechado.

Fonte: Costa, 2002.



Figura 2.27 – Coletor solar plano aberto.

Fonte: FINEP/SolBrasil, 2006.

A constituição básica do coletor solar plano fechado inclui caixa externa (geralmente perfil de alumínio ou chapa dobrada), isolamento térmico (a lã de vidro é o material mais utilizado na indústria brasileira para esta função), tubos ou flauta

(normalmente de cobre devido a sua alta condutividade térmica e resistência à corrosão), placa absorvedora e aletas (em cobre ou alumínio), cobertura transparente (geralmente de vidro) e vedação (McVEIGH, 1977).

As perdas e ganhos dentro do painel fechado podem ser visualizadas na Figura 2.28. A água é aquecida no momento em que o líquido passa pela caixa externa, quando a radiação solar incide no coletor. Quando a energia solar incide na cobertura, a maior parte é transmitida pela cobertura e uma parte menor é refletida. A presença do vidro causa efeito estufa que aumenta a concentração de energia no sistema, sendo essa energia térmica removida pelo fluido que escoar no interior dos tubos (HINRICHS e KLEINBACK, 2003).

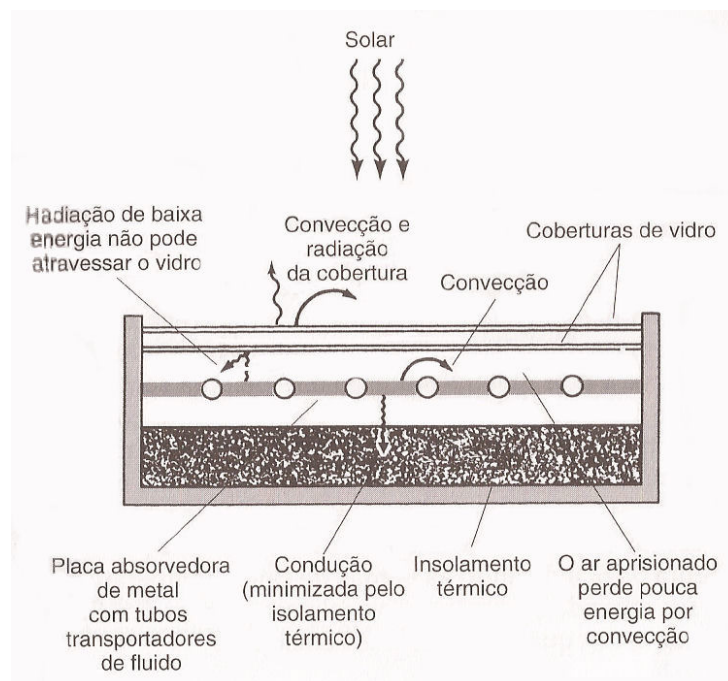


Figura 2.28 – Corte lateral de um coletor de placa plana (CPP) mostrando as perdas e os ganhos de calor

Fonte: Hinrichs e Kleinback, 2003.

A Figura 2.29 apresenta o espectro da transmitância para o vidro comum, que é usado na maioria dos coletores solares. O vidro é bastante transparente à radiação para comprimentos de onda de $0,3 \mu\text{m}$ a $2,5 \mu\text{m}$ (espectro solar) e altamente absorvedor para comprimentos de onda próximos e maiores que $5 \mu\text{m}$ (infravermelho). Devido a essa propriedade seletiva, o vidro absorve a radiação emitida pela placa absorvedora que está aquecida.

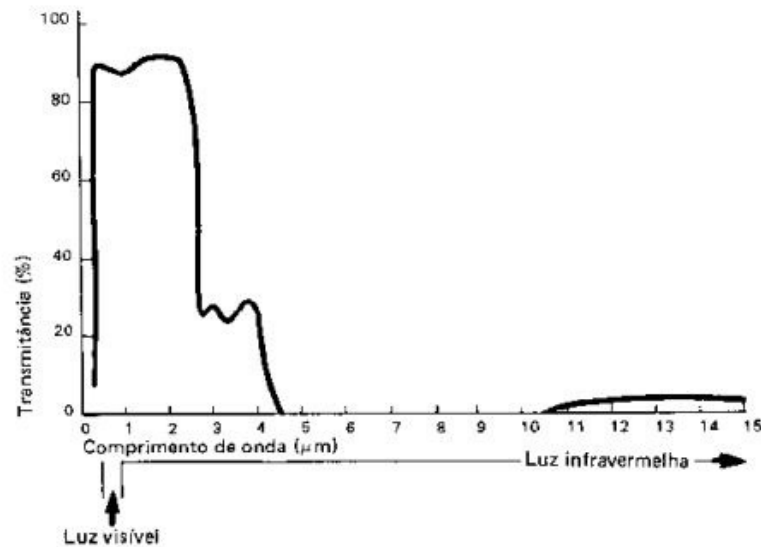


Figura 2.29 – Transmittância do vidro comum em função do comprimento de onda.

Fonte: Palz, (1981).

Segundo Lourenço Júnior (2000) o vidro, além de permitir que a energia solar incidente seja transmitida à placa absorvedora, evita a perda de calor por radiação emitida pela placa absorvedora, e impede as perdas por convecção, que seria a perda de energia mais significativa, devido às correntes de ar.

Os coletores solares planos abertos, diferentemente dos fechados, não possuem em sua constituição caixa externa, isolamento térmico e cobertura transparente, sendo normalmente fabricados em materiais termoplásticos, polipropileno, EPDM (Etileno Propileno) e borrachas especiais (PEREIRA et al, 2003).

Nessa situação a água não consegue atingir altas temperaturas, pois a tubulação fica exposta ao clima, perdendo muita energia por convecção. Este tipo de coletor é barato e normalmente recomendado para aquecer a água de piscinas.

Este trabalho utiliza um painel para aquecimento de água semelhante às placas fechadas com vidro, o diferencial é que o ar dentro do sistema não é estanque. Para maximizar o rendimento do coletor e assegurar que ele seja satisfatório algumas precauções devem ser tomadas de acordo com (LOURENÇO JÚNIOR, 2000).

- a cobertura deve possuir alta transparência para a radiação solar e alta absorvidade para radiação infravermelha;

- a placa absorvedora deve ser preta para garantir maior absorção de energia e possuir alta condutividade térmica para transferir esta energia ao fluido;
- a caixa deve ter um excelente isolamento térmico na parte lateral e na parte inferior, que minimize as perdas de calor para o ambiente, e possuir uma eficiente vedação para impedir a entrada de umidade.

b) Reservatório térmico

Devido às intermitências da radiação solar, é imprescindível o armazenamento da energia captada nos painéis solares durante o dia com o uso de um reservatório térmico – os boilers. Esses reservatórios devem manter a água aquecida para seu uso posterior, devendo evitar a transferência de calor para o meio, sendo compostos por materiais que possuam baixa condutividade. Os principais componentes estão destacados na Figura 2.30. Os reservatórios podem ser abertos (não pressurizados) ou fechados (pressurizados), sendo os reservatórios fechados os mais comumente utilizados, pois são adequados às instalações de pequeno, médio e grande porte.

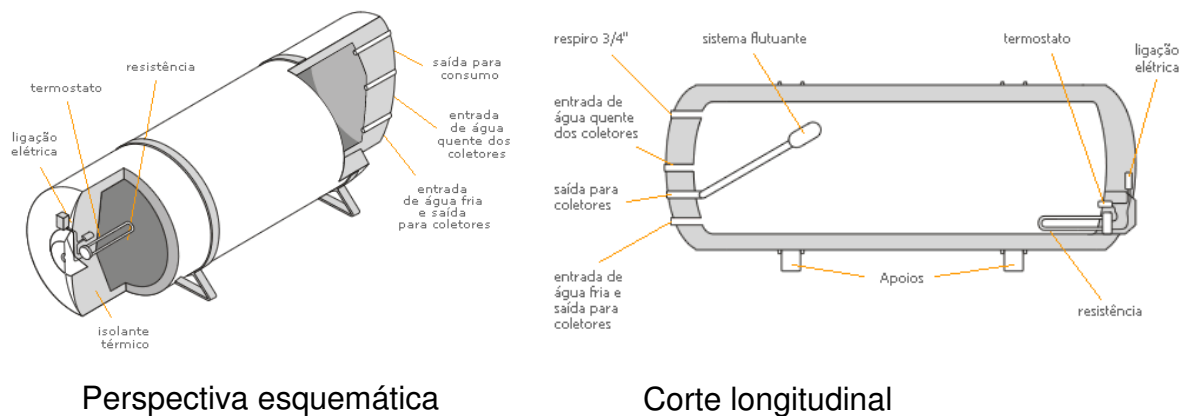


Figura 2.30 – Esquema construtivo de um reservatório de água quente solar

Fonte: Transen, 2004.

O consumo de água em uma edificação varia de acordo com o número de usuários e o tipo de atividades envolvendo a água. O volume de um reservatório deve ser calculado com base em tabelas como as da ABNT (1993) NBR 7198 Projeto e execução de instalações prediais de água quente (Tabela 2.7) e do PROCEL (2003) (Tabela 2.8).

Tabela 2.7 – Consumo diário de água quente por dia.

Alojamento Provisório de Obra	24	litros por indivíduo
Casa Popular ou rural	36	litros por indivíduo
Residência	45	litros por indivíduo
Apartamento	60	litros por indivíduo
Quartel	45	litros por indivíduo
Escola (Internato)	45	litros por indivíduo
Hotel (sem incluir cozinha e lavanderia)	36	litros por indivíduo
Hospital	125	litros por leito
Restaurante e Similares	12	litros por refeição
Lavanderia	15	litros por Kg de roupa seca

Fonte: ABNT, (1993).

Tabela 2.8 – Consumo de água quente por pessoa

Chuveiro	50	litros por banho
Banheira para uma pessoa	100	litros por banho
Banheira para duas pessoas	200	litros por banho
Torneira de água quente	50	litros por dia
Máquina de lavar pratos	150	litros por dia
Máquina de lavar roupa	150	litros por dia

Fonte: PROCEL (2003).

Para que um reservatório tenha maior eficiência, ele deve ser composto por materiais que possuam baixa condutividade, resistência à corrosão, resistência mecânica e resistência a altas temperaturas, geralmente na faixa de 60 a 80°C. Além disso, a NBR 15569, ABNT (2008), descreve alguns procedimentos para instalação com máxima eficiência do sistema, sendo também indicado o uso de um sistema auxiliar de aquecimento e de termostatos para controle da temperatura no interior do boiler.

O boiler geralmente tem o formato cilíndrico, pois esta é a forma geométrica, exceto a redonda, que permite menor área de contato com o ambiente, diminuindo as perdas de calor. Assim, esses reservatórios são normalmente constituídos por

duas superfícies cilíndricas, uma interna e outra externa, tendo entre as mesmas, um isolamento térmico.

Os materiais mais comuns para isolamento são a lã de vidro e o poliuretano expandido. Esses materiais possuem baixa condutividade, na ordem de 0,03 – 0,04W/mK, sendo imprescindíveis para a diminuição da perda térmica na água aquecida. O poliuretano possui um poder isolante superior a outro material, já que é composto por mais de 90% de ar e o restante de plástico.

Os reservatórios térmicos convencionalmente utilizados em sistemas solares de aquecimento são geralmente fabricados em aço inoxidável, cobre ou aço carbono, para volumes de até 15 mil litros. Contudo, pode-se afirmar que “o uso de inoxidáveis é a melhor solução, por formar uma película de óxido de cromo (Cr_2O_3) protetora quando expostos a meios oxidantes, além de apresentarem boa resistência mecânica” (GONORING e AZAMBUJA, 2009).

Outras opções utilizadas na construção de reservatórios são lâminas de aço esmaltado e galvanizado, apesar de possuírem baixa vida útil (8 anos), materiais poliméricos que resistem a altas temperaturas e o uso de fibra de vidro com pintura epóxi, a mais amplamente empregada em relação aos materiais citados neste parágrafo.

Existem diversos aspectos que devem ser cuidados para se proceder a instalação de um reservatório térmico. A NBR 12269-8, ABNT (2002), sugere que os reservatórios térmicos sejam instalados numa estrutura de apoio de forma a resistir aos esforços aplicados quando cheios e os suportes de fixação devem ser adequados para resistir peso extra para as ocasiões de manutenção do equipamento. Quanto ao abastecimento por água fria, esta norma sugere que este reservatório deve ter o seu nível superior abaixo do nível inferior de tomada d'água do reservatório de água fria. Outros casos devem considerar utilização de dispositivos específicos que permita trabalhar em nível com o reservatório de água fria. Além disso, essa alimentação deve ser feita com tubulação de diâmetro igual ou superior à tubulação de água quente e ser dotada de sifão, de forma a impedir o retorno de água quente ao reservatório de água fria. A altura mínima do sifão deve estar de acordo com as especificações, manual e projeto, não devendo ser inferior a 30 cm de altura, como exemplifica a Figura 2.31.

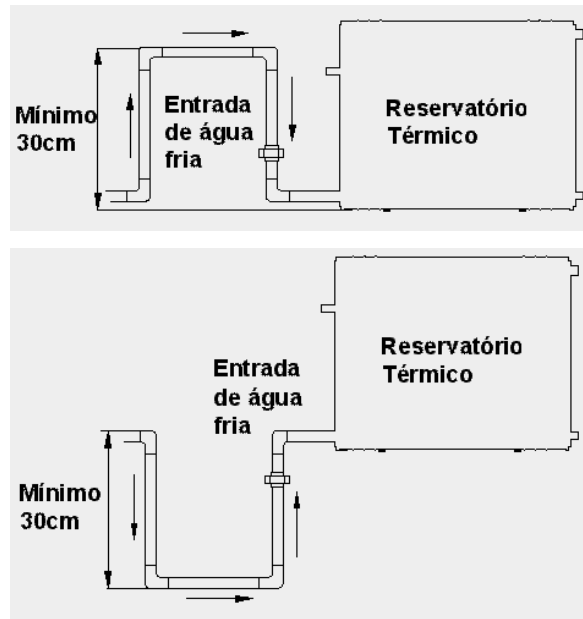


Figura 2.31 – Exemplos de sifão na entrada de água fria

Fonte: NBR 12269-8, 2002.

Quanto à instalação, segundo a ABNT (2006), a tubulação deve ficar em posição ascendente, a partir do ponto de conexão mais alto do reservatório térmico, sem restrições, obstrução ou mudança brusca de direção. Além disso, o tubo deve ultrapassar em no mínimo 0,30cm, o nível de água máximo da caixa de alimentação de água fria, o diâmetro interno do tubo deve ser conforme especificação, manual do fabricante ou projeto, mas nunca inferior a 15mm.

A tubulação de alimentação de água fria deve ser executada com material que resista às condições de pressão e temperatura do sistema de aquecimento solar (SAS) e com comprimento mínimo de 1,5m a partir do sifão no sentido oposto ao fluxo de alimentação. No caso de reservatório de água fria não exclusivo para abastecimento do SAS, a tubulação de alimentação de água fria deve ser dotada de sifão e de válvula de retenção, de forma a impedir o retorno de água quente ao reservatório de água fria.

A pressão do sistema pode ser de alta ou de baixa pressão. Os boilers de baixa pressão são mais econômicos e são indicados para instalações nos projetos em que a caixa de água fria esteja logo acima do boiler, sendo que o seu nível de água deverá estar no máximo com 2 m.c.a, para os modelos em cobre, e 5 m.c.a, para os modelos em inox. Os modelos de baixa pressão não podem ser

pressurizados ou alimentados com água da rede pública. Os de alta pressão são recomendados para sistemas pressurizados e instalações onde a caixa de água fria está muito elevada, no máximo 40 m.c.a. (SOUZA et al., 2006).

Para garantir que a água de consumo sempre atinja a temperatura adequada, é usual acoplar-se um equipamento de aquecimento auxiliar ao reservatório térmico, o qual pode ser elétrico, a lenha ou a gás, sendo definido qual meio utilizar levando-se em conta a praticidade de manuseio, a estocagem, a garantia de fornecimento, o custo de instalação e a própria energia auxiliar.

De acordo com Lourenço Júnior (2000) no Brasil o mais comum é o uso de energia auxiliar por eletricidade, devido ao baixo custo de implementação, facilidade de instalação e controle. Esse tipo de aquecedor é um resistor blindado de potência entre 2,5KW a 5KW, dependendo do volume do reservatório térmico, o qual é conectado em série com um termostato e instalado no interior do reservatório.

O sistema de aquecimento auxiliar pode estar na circulação entre o reservatório e os pontos de consumo deixando na temperatura ideal apenas a água que será consumida imediatamente, ou pode se localizar externa ou internamente ao boiler, deixando toda a água deste na temperatura ideal para o consumo.

O termostato regula o aquecimento da água, fechando o circuito quando a temperatura da água esta abaixo dos valores ajustados e, permitindo assim que uma corrente elétrica aqueça o resistor e conseqüentemente a água. Quando ocorre o processo inverso, ou seja, a temperatura da água está acima dos valores ajustados, o termostato abre o circuito, impedindo a passagem de corrente elétrica. Esse dispositivo deve estar bem ajustado para um bom funcionamento do sistema e economia de energia elétrica.

Outra forma de deixar a água de consumo na temperatura ideal é com o uso de ducha eletrônica, ela liga automaticamente na falta de água quente aos 30°C do aquecedor ou enquanto a água quente do reservatório ainda não chegou ao chuveiro, evitando o desperdício de água no banho. Também desliga automaticamente quando a temperatura da água chega aos 50°C do aquecedor, é considerando o sistema de aquecimento auxiliar com menor desperdício de energia elétrica e de água.

c) Circuito termotransportador

É o sistema de tubulações que transportam a água que é aquecida no coletor

até o reservatório, é responsável pelo transporte do calor recolhido pelo coletor. Pode ser um circuito aberto ou fechado. Pelo circuito aberto circula e é aquecida a água que será consumida posteriormente, já nos circuitos fechados a água de consumo não passa pelo coletor, o fluido circula pela tubulação até um reservatório térmico onde a energia térmica, por meio de um trocador de calor, aquecerá a água contida no boiler, dessa forma o sistema fica mais resistente às incrustações e à deterioração prematura, o que aumenta a qualidade da água de consumo e a durabilidade dos componentes do sistema.

Conforme Cabirol, Pelissou e Roux, (1980) em climas mais frios é necessário prever uma proteção contra o congelamento para evitar a ruptura do coletor solar no inverno. Como solução possível é indicado esvaziar o circuito durante os períodos em que a geada pode acontecer, ou utilizar para o circuito um material que suporte as dilatações que ocorrem devido ao congelamento ou ainda misturar ao circuito um fluido anticongelante o que tira a potabilidade da água. Esta última solução apresentada pode ser resolvida com a utilização de um trocador de calor: mistura-se a água com um fluido anticongelante circular do coletor num circuito fechado, passando por uma serpentina instalada no depósito de água quente.

2.4.3.2 Tipos de circulação nos sistemas de aquecimento de água

Os sistemas de circulação de água podem ser separados em dois grupos: termo-sifão, que é a circulação de forma natural, e circulação forçada, por meio de bomba.

Os sistemas de aquecimento de água com circulação natural (termossifão) são recomendados para instalações de pequeno porte, como residências unifamiliares, prédios pequenos ou sistemas independentes. Já nas instalações de médio e grande porte, é mais comum o uso de sistemas de circulação forçada.

Para Siqueira (2009), entre o nível do reservatório e a saída de água quente do coletor deverá existir um desnível mínimo de 60 centímetros (até no máximo 5 metros) para que o termossifão funcione de maneira adequada. Já Huang (1980), juntamente com outras diversas bibliografias consagradas, indica que a diferença de altura entre os coletores solares e o tanque de armazenamento deve ser maior do

que 30 cm, para que não ocorra a circulação reversa.

A bomba de água é comandada por um sistema de controle através de sensores de temperatura localizados no fundo do tanque e na saída do coletor. Essa bomba estará em funcionamento sempre que a temperatura do fluido na saída do coletor permanecer maior que a temperatura da água que entra no coletor (fundo do reservatório térmico).

Já em um sistema de aquecimento solar bombeado, não é necessário que o coletor esteja abaixo do reservatório, pois quem promove a circulação de água entre os coletores e o reservatório é a bomba hidráulica. O funcionamento da bomba é controlado pelo CDT - Controlador Diferencial de Temperatura - que avalia o momento correto para ligar o sistema.

As Figuras 2.32 e 2.33 apresentam os componentes básicos de uma instalação tipo termossifão e tipo forçada, respectivamente.

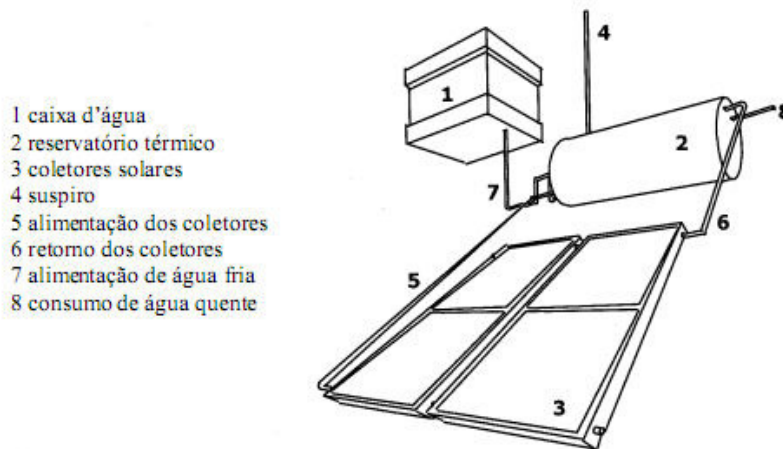


Figura 2.32 – Circulação natural ou termossifão.

Fonte: Mesquita, 1999.

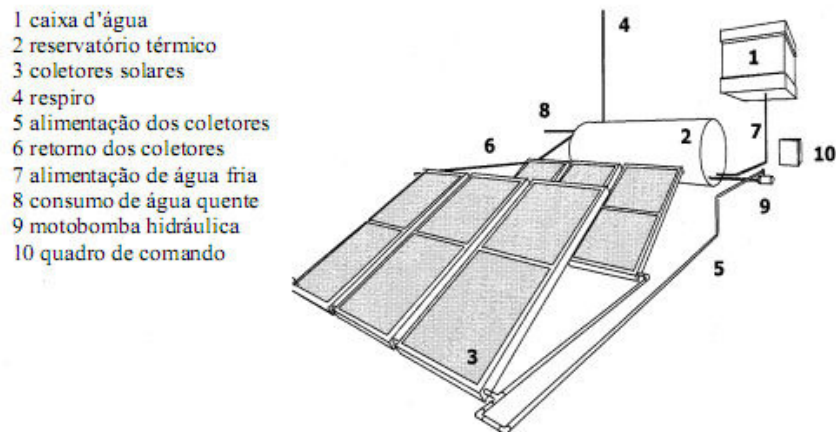


Figura 2.33 – Sistema de circulação forçada.

Fonte: Mesquita, 1999.

A manutenção dos sistemas de aquecimento solar de circulação natural é pequena, mas o usuário deve inspecionar visualmente os coletores solares, no mínimo, uma vez a cada três meses, certificando-se das condições de limpeza e verificando a ocorrência de alterações na superfície do coletor solar (MESQUITA, 1999).

2.4.3.3 Aquecedores de água de baixo custo

Além dos coletores solares industrializados, alguns pesquisadores vêm desenvolvendo soluções tecnológicas de baixo custo substituindo materiais convencionais por materiais não convencionais. De acordo com Fantinelli (2002), as soluções tecnológicas de baixo custo são práticas que aliam eficiência energética a baixos investimentos para o contexto econômico e social das populações de baixa renda.

O sistema alternativo desenvolvido por Souza (2002) no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - LES/UFRN, possui tubulação do coletor em labirinto e aletado, como pode ser visto na Figura 2.34, baseado nos coletores planos convencionais, mas com a substituição dos tubos de cobre por tubos de PVC.



Figura 2.34 – Sistema de aquecimento alternativo de Souza.

Fonte: Souza, 2002.

Para socializar o aquecedor solar de água, uma equipe residente no Centro Incubador de Empresas Tecnológicas - CIETEC/SP - desenvolveu em 1999 o Aquecedor Solar de Baixo Custo - ASBC. O ASBC assemelha-se a coletores solares utilizados em piscina, pois não possuem cobertura transparente.

O sistema básico do ASBC, Figura 2.35, é composto por três placas coletoras de PVC interligadas e pintadas de preto e por um reservatório de volume útil de 170 litros. Cada placa coletora é composta de um perfil de forro de PVC modular com tubos de PVC agregados às suas extremidades. O funcionamento do sistema é através de termossifão, nome dado à circulação natural da água entre as placas coletoras e reservatório.



Figura 2.35 – Sistema ASBC.

Fonte: ASBC, 2003.

A empresa Mineração Jundu Ltda, localizada na cidade de Descalvado/SP, em 1980, projetou e fabricou aquecedores solares de baixo custo e os instalou em um conjunto residencial construído pela mineradora, para uso dos seus próprios funcionários. Das 100 residências pertencentes a este conjunto, apenas 60 foram contempladas com estes aquecedores (CPFL, 1989).

Este aquecedor foi desenvolvido para atender as necessidades de aquecimento de água para banho, com um relativo baixo custo de investimento. As 60 residências também possuíam chuveiro elétrico, utilizado eventualmente, e mesmo assim reduziam 30% no consumo mensal de energia elétrica.

Devido à substituição dos materiais, esperava-se vida útil reduzida destes sistemas no decorrer do tempo, pela falta de manutenção. Embora não tenham sido efetuadas medições dos parâmetros operacionais do sistema que pudessem fornecer resultados sobre o desempenho e rendimento térmico do mesmo, em 1989, ainda continuavam funcionando e atendendo satisfatoriamente a comunidade beneficiada (CPFL, 1989).

A diferença básica entre os sistemas convencionais existentes e o aquecedor da Mineração Jundu, é que este último não possui isolamento térmico, são montados em caixas de aço, substituindo o alumínio normalmente utilizado em sistemas convencionais de aquecimento solar de água, e possui absorvedores fabricados de chapas galvanizadas, substituindo os tubos de cobre fixados em chapa de alumínio normalmente utilizados.

Este sistema funciona pela circulação natural dos fluidos. A placa coletora (coletor solar) é formada por duas chapas de aço galvanizadas, paralelas, com as bordas dobradas e vedadas por silicone, e apresenta área de 2m², com dimensão 2x1 m. O princípio de funcionamento utilizado é o de pré-aquecimento, pois no inverno, principalmente no período da manhã ou em dias em que a demanda de água aquecida for superior à capacidade do reservatório térmico (aproximadamente 320 litros), o chuveiro elétrico pode ser utilizado para suprir esta carência. Cada uma das residências onde foi aplicado o aquecimento solar de baixo custo possui um chuveiro elétrico com 3kW de potência nominal (CPFL, 1989). Os reservatórios de água quente e fria são cilindros justapostos construídos com chapa de aço e pintados para proteção contra a corrosão, pode-se observar o esquema dos componentes na Figura 2.36.

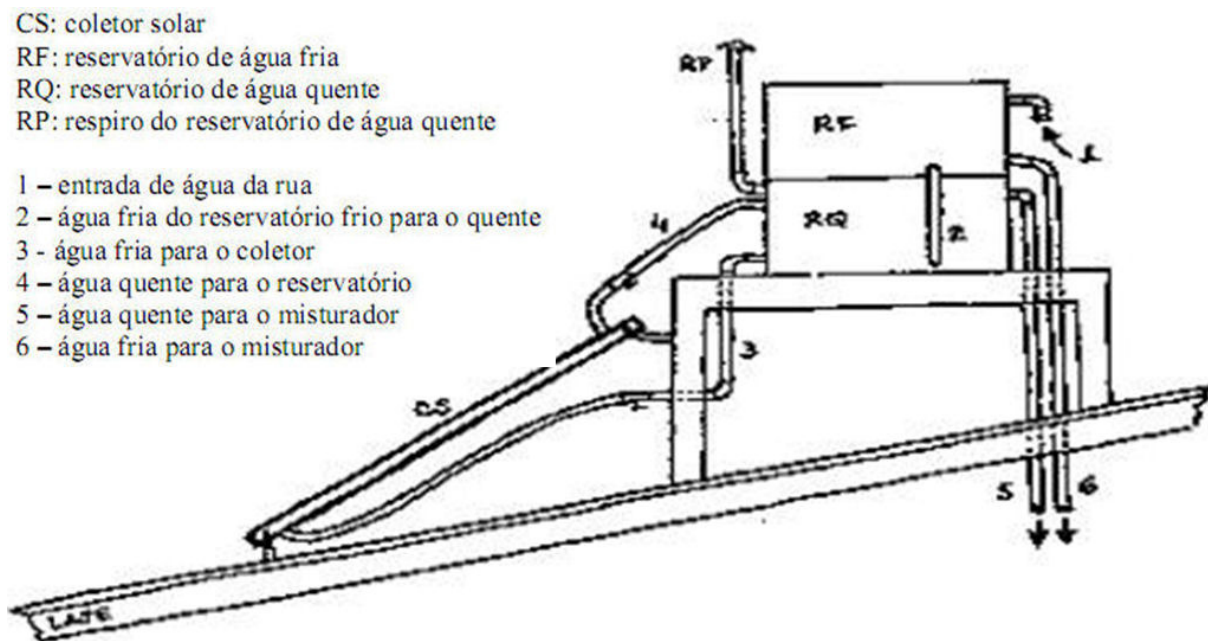


Figura 2.36 – Esquema dos componentes do sistema de aquecimento solar de água Mineração Jundu.

Fonte: CPFL, 1989.

Desde 1989, a CPFL vem estudando o aproveitamento da energia solar para aquecimento de água residencial. No decorrer dos estudos realizados foi gerada a idéia de um chuveiro elétrico de baixa potência, auxiliado por um aquecedor solar de

baixo custo. Esta tecnologia foi chamada de pré-aquecedor solar para chuveiros elétricos de potência reduzida. O sistema se baseia em um modelo de aquecimento solar convencional, cuja energia auxiliar se necessária será fornecida pelo próprio chuveiro elétrico (OLIVA e BORGES, 1996).

O projeto consiste basicamente em sistema de aquecimento solar de água de uso doméstico, de baixo custo, que permita contribuir para a redução da demanda de potência no horário de ponta da curva de carga do sistema elétrico da concessionária. O coletor solar é constituído por tubos de cobre e aletas de alumínio pintadas de preto, com caixa de alumínio coberta com vidro e isolada termicamente com poliuretano expandido, conforme se observa na Figura 2.37 (OLIVA e BORGES, 1996).

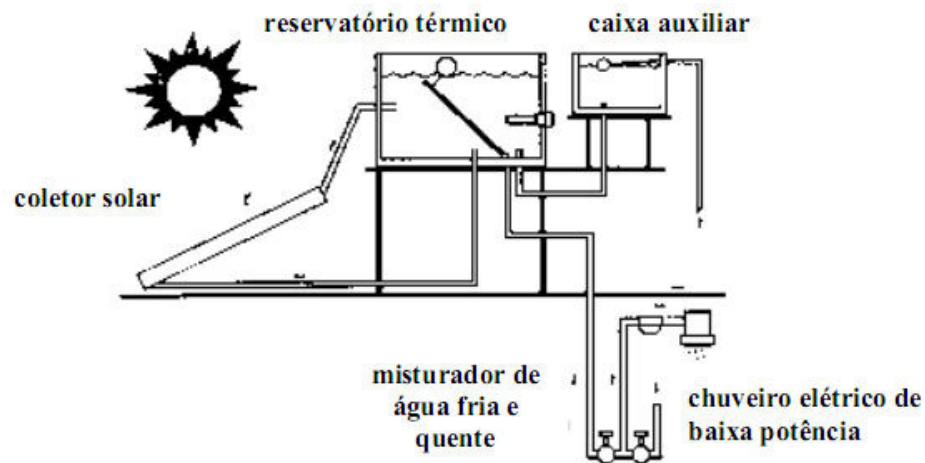


Figura 2.37 – Esquema de Pré-aquecedor solar.

Fonte: Oliva e Borges, 1996.

O desenvolvimento da tecnologia do pré-aquecedor foi realizada em conjunto pela Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL e Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, tendo o apoio de fabricante de equipamentos ligados ao assunto (OLIVA e BORGES, 1996).

2.4.2.4 Sistemas Solares Combinados - *Combisystems*

Um sistema solar combinado é um sistema de aquecimento solar que fornece simultaneamente aquecimento de ambientes e de água para o consumo, originados de uma matriz comum de coletores solares térmicos, normalmente ligados a uma fonte de calor auxiliar. Com base nesses sistemas combinados foi elaborado este projeto, para ser usado nas regiões de clima frio do Brasil, com o máximo rendimento.

Segundo Weiss 2003, esses sistemas podem variar de tamanho, sendo que os menores são instalados em propriedades individuais, como na Figura 2.38, e os maiores aqueles que servem várias residências em um esquema de bloco de aquecimento, como mostra a Figura 2.39.



Figura 2.38 – Sistema solar combinado em propriedades individuais, na Áustria.

Fonte: Weiss, 2003.



Figura 2.39 – Bloco de aquecimento, situado na cobertura do edifício.

Fonte: Weiss, 2003.

Dependendo do tamanho do sistema instalado, a contribuição anual de aquecimento do ambiente pode variar de 10% a 60%, ou ter baixo consumo energético (WEISS, 2003). A necessidade de calor restante é fornecido por uma ou mais fontes auxiliares de calor, as quais também podem usar outras fontes de energia renováveis.

Sistemas combinados são mais complexos que sistemas domésticos de aquecimento de água, pois tem maiores interações com outros sistemas. Eles são formados geralmente por cinco elementos: um circuito de coletores solares, um subsistema de armazenamento, um subsistema de controle, um subsistema auxiliar e um subsistema de distribuição de calor.

Estes sistemas normalmente não têm capacidade de refrigeração, apesar de já ser considerado que no futuro a refrigeração possa ser incorporada. Em projetos especiais, o subsistema de armazenamento pode ser combinado com o subsistema de distribuição de calor, como por exemplo, no uso de piso aquecido.

Segundo Weiss (2003) o projetista precisa analisar: calor absorvido, ou não, por um aquecedor, o número de tanques de armazenamento, o tipo de permutador de calor usado para transferir calor de um meio a outro, a geometria de entrada de fluido no tanque de armazenamento e a vazão, pois ambos influenciam na mistura, os algoritmos utilizados, as dimensões de todos os componentes e a geometria da

inserção mecânica, chamada de estratificadores, destinados a reforçar a estratificação.

Aproximações úteis de desempenho podem ser produzidas de forma relativamente fácil, porém previsões precisas continuam difíceis. Já são utilizados diversos programas de simulação e cálculo para auxiliar nessas decisões.

Segundo os trabalhos publicados pela *International Energy Agency* - IEA (1998-2002), sistemas solares combinados podem ser classificados de acordo com dois aspectos principais:

- na categoria de armazenamento de calor, ou seja, na forma em que a água é adicionada e retirada do tanque de armazenamento e seus efeitos sobre a estratificação; e
- na categoria de gestão de sistema de apoio, ou seja, a forma em que os aquecedores auxiliares são integrados ao sistema.

Ainda segundo Weiss (2003), a manutenção da estratificação, ou seja, a variação da temperatura da água, fria na parte inferior do tanque e quente na parte superior, é importante para que o sistema possa fornecer água quente e aquecimento de água em diferentes temperaturas.

Recurso 1: categoria de armazenamento de calor:

- a) Nenhum dispositivo de armazenamento controlado para aquecimento.
- b) Gestão de calor e valorização de estratificação por meio de vários tanques e/ou pela entrada/saída de vários tubos e/ou por válvulas de três ou quatro vias para controlar o fluxo através da entrada/saída de tubos.
- c) Gerenciamento de calor usando convecção natural em tanques de armazenamento e/ou entre eles a manutenção da estratificação, em certa medida.
- d) Calor de gerenciamento usando convecção natural em tanques de armazenamento e construído em dispositivos de estratificação.

Recurso 2: Categoria de gestão de sistema de apoio:

M - Modo misto: O circuito de aquecimento é alimentado por um único tanque aquecido por dois coletores solares e o aquecimento auxiliar.

P - Modo Paralelo: O circuito de aquecimento é alimentado, em alternativa, pelos coletores solares (ou um tanque de armazenamento de água solar), ou pelo

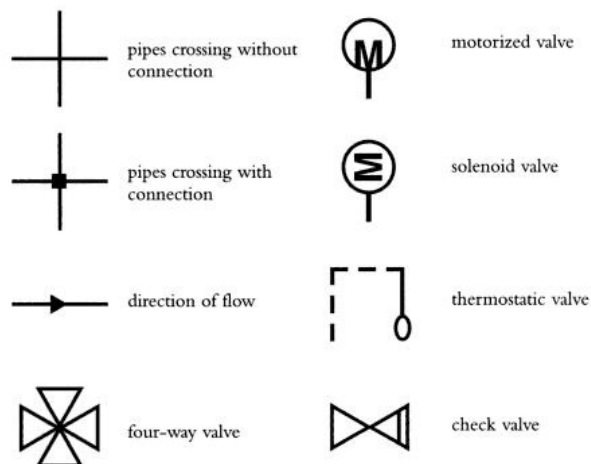
aquecedor auxiliar, ou não existe conexão hidráulica entre a distribuição do calor solar e as emissões de calor auxiliares.

S - Modo de série: Os ciclos de aquecimento do espaço podem ser alimentados pelo aquecedor auxiliar, ou por ambos os coletores solares (ou um tanque de armazenamento de água solar) e o aquecedor auxiliar conectado em série na linha de retorno do circuito de aquecimento.

Dentro destes tipos, os sistemas podem ser configurados de várias maneiras diferentes para as residências unifamiliares, por exemplo, pode ou não existirem tanques de armazenamento, controle e resistência auxiliar integrados em um único pacote pré-fabricado. Em contraste, há também grandes sistemas centralizados, servindo a um grande número de propriedades, o que gera diversificados tipos de sistemas.

O sistema do tipo A, não tem dispositivo de armazenamento controlado, em vez disso possui uma bomba que conduz a água quente dos coletores solares até as tubagens de aquecimento central radiante embutidos na laje de piso em concreto. A laje é engrossada com uma massa térmica, para que o calor das tubulações no interior da laje seja liberado durante a noite.

Sistemas solares combinados usam tecnologias similares às utilizadas para o aquecimento de água por energia solar e para pisos aquecidos. O diferencial é a maneira que estas tecnologias são combinadas, e os sistemas de controle usados para integrá-los, sendo genericamente apresentados de acordo com o esquema da Figura 2.40.



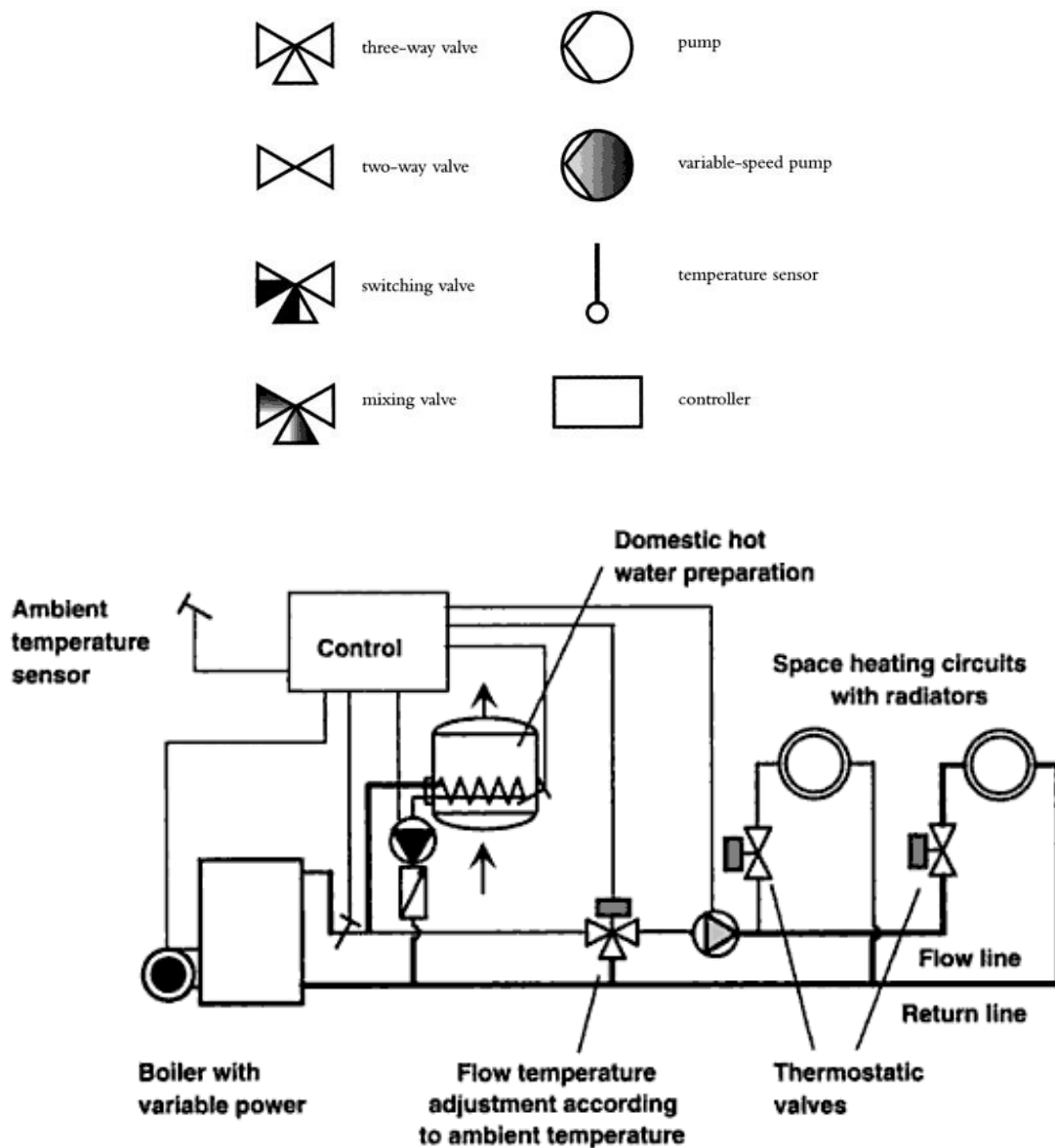


Figura 2.40 – Esquema do sistema de distribuição de calor pelo espaço de aquecimento de uma edificação genérica.

Fonte: Weiss, 2003.

Para escolha das tecnologias utilizadas deve-se considerar a demanda de espaço para aquecimento que depende das perdas por condução e convecção na envoltória, do ganho solar passivo através das janelas, das perdas por ventilação para propiciar qualidade interior do ar, dos ganhos de energia pelos aparelhos elétricos usados, pelas pessoas dentro do prédio e pela iluminação artificial, da massa térmica; e da infiltração devido à falta de vedação.

Na Alemanha, o sistema combinado genérico é uma unidade compacta de

aquecimento de ambientes e de água, com um aquecedor a gás ou a óleo. O tanque de armazenamento esta equipado com dois permutadores de calor imersos em lamelas horizontais imersas. Um na parte mais baixa e outro na parte mais alta, conforme Figura 2.42.

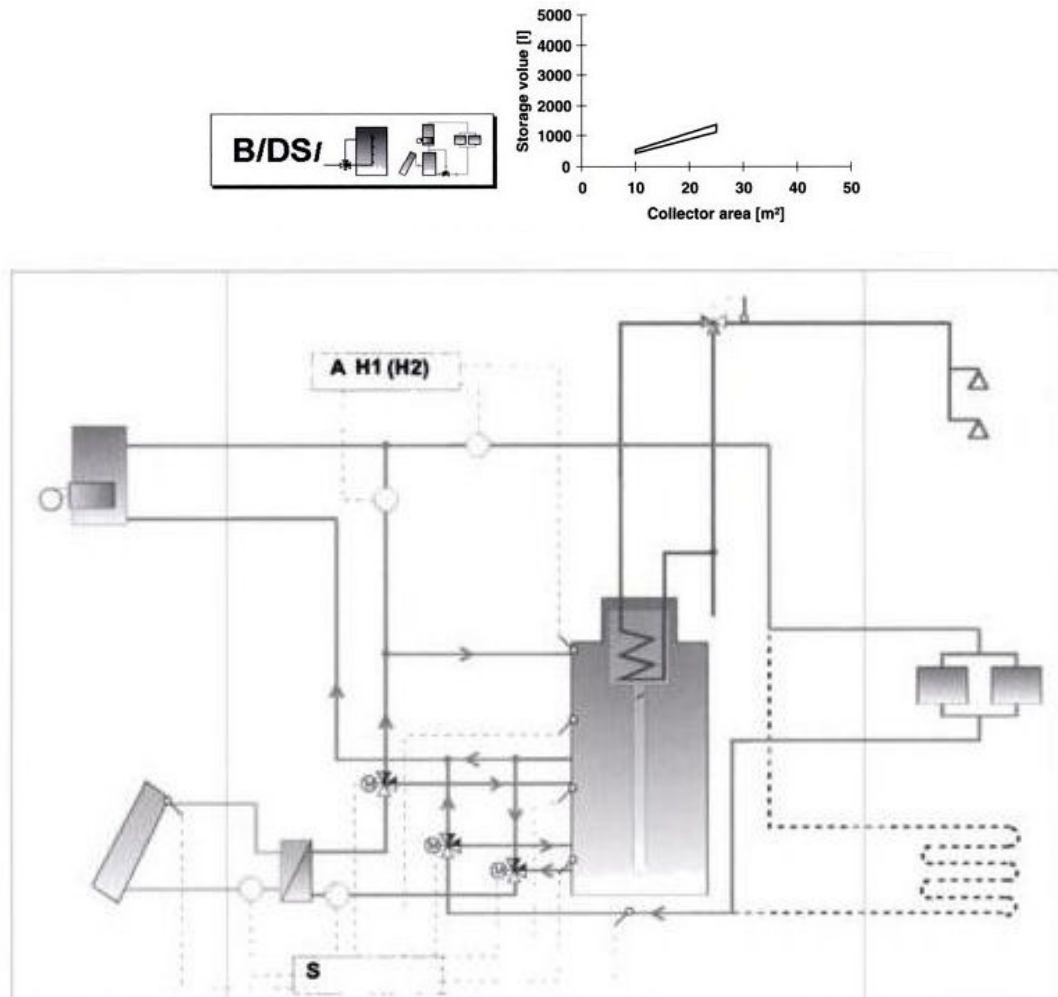


Figura 2.41 – Sistema solar combinado – modelo genérico na Alemanha.

Fonte – Weiss, 2003.

O circuito do coletor desse sistema trabalha usando a água como princípio de transferência de calor. A taxa de fluxo no circuito do coletor é variável. O sistema trabalha como um sistema de pré-aquecimento para o espaço de aquecimento.

A taxa de fluxo pode variar de 20-100% do fluxo máximo. Quando a temperatura no tanque de armazenamento esta em aproximadamente 45°C, a taxa de fluxo do circuito do coletor é ajustada para dar uma diferença de 30°C entre a saída do coletor e o meio do tanque. Em outros casos, ela pode ser ajustada para

15°C. Quando a temperatura no meio do tanque de armazenamento excede 90°C, ou se a diferença de temperatura entre a saída do coletor e o fundo do tanque cai abaixo de 4°C, a bomba do circuito do coletor é desligada. Quando a temperatura no topo do tanque cai para 54°C, o sistema de aquecimento auxiliar é ativado. Quando a temperatura no interior do tanque é 3°C acima que o espaço de aquecimento de temperatura de retorno, então a válvulas de 3 caminhos é aberta permitindo a circulação dentro do tanque.

Na Suíça, o uso desse sistema é comum desde 1976 (WEISS, 2003). Conforme a Figura 2.42, a velocidade da bomba do coletor loop varia de acordo com a temperatura no meio do tanque e com a diferença entre a saída do coletor e a parte do fundo do tanque. Os pontos de temperatura do tanque de armazenamento, que controlam o aquecedor primário, são ajustados automaticamente conforme a necessidade de aquecimento do ambiente.

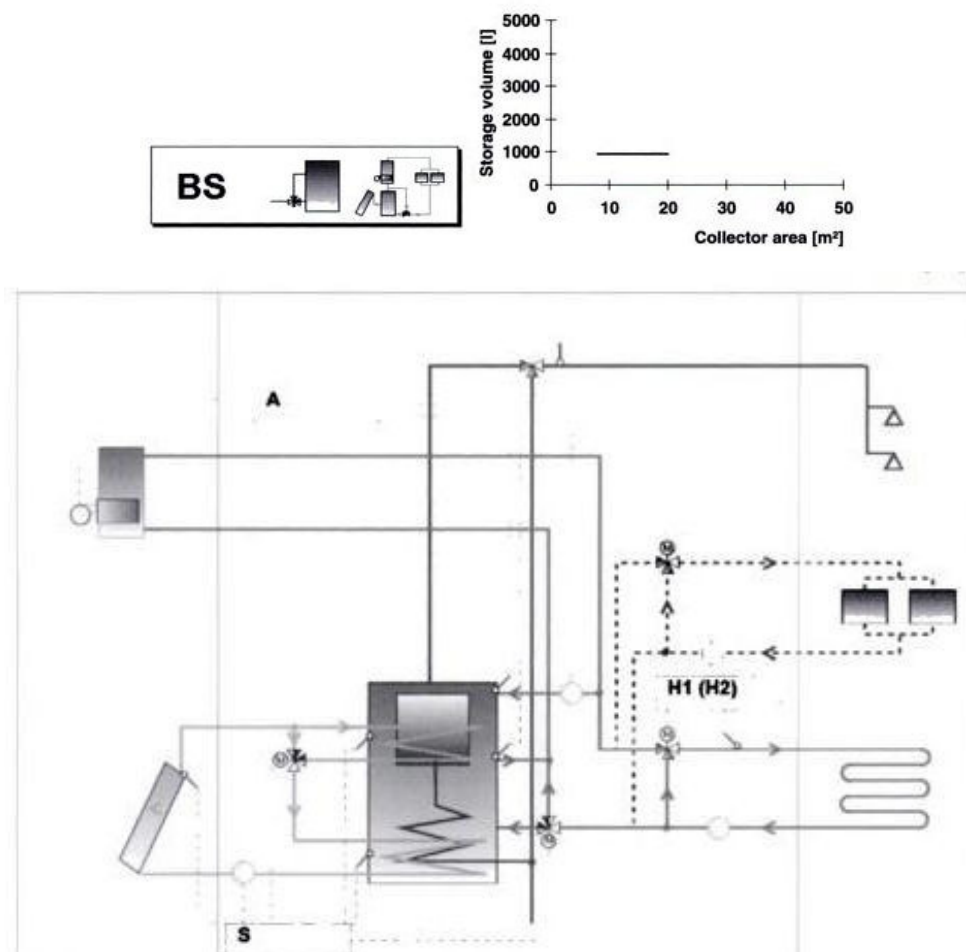


Figura 2.42 – Sistema solar combinado – modelo genérico utilizado na Suíça.

2.5 Propriedades dos materiais

O conhecimento dos materiais de construção e da sua seleção de maneira correta é de grande importância quando se busca a redução do consumo de energia por meios mecânicos. No entanto, quando se trata em obter condições de conforto térmico por meios passivos em edificações, o seu estudo se torna fundamental (CRUZ, 1999).

Segundo Cruz (1999), as características térmicas fundamentais dos materiais são: condutividade térmica (k), densidade (ρ), calor específico (c), calor volumétrico (ρc), difusividade térmica (a) e efusividade térmica (b).

2.4.1 Condutividade Térmica (k):

A condutividade térmica (k) expressa a capacidade do material para conduzir calor, segundo a NBR 15.220-1, é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante (ABNT, 2003). É expressa por W/(mK).

O intervalo de valores de condutividade térmica nos materiais é muito amplo. A condutividade térmica deve ser baixa quando se pretende minimizar as perdas de calor, caso típico de isolantes e, alta quando se deseja maior transferência de calor, em casos de operações de aquecimento, como em painéis solares ou para evitar fissuras e trincas devido ao choque térmico. Entre os menos condutores, como poliuretano expandido (0,026 W/mK), e os mais condutores, como o cobre (389 W/mK), existe uma relação de 1 a 1.5000.

2.5.1 Calor Específico (c):

O calor específico (c) de um material é definido como a quantidade de calor necessária para incrementar em uma unidade de temperatura a unidade de massa do material. Sua unidade é expressa em J/(kg. K) (KOENIGSBERGER et al, 1977).

Quanto mais elevado o calor específico de uma substância, mais calor

absorverá para um incremento dado de temperatura. A água, entre todas as substâncias, é a que tem o calor específico mais elevado: $4.187 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Em função disso, a água é utilizada como meio de armazenamento térmico em várias situações, como foi adotado neste projeto, em que a água é o meio de armazenamento de calor no reservatório e o meio de transferência de energia utilizado dentro das serpentinas do coletor solar para aquecimento da água de consumo.

2.5.2 Densidade (ρ):

A densidade (ρ), ou massa volumétrica de um material, define o quociente entre a quantidade de massa (kg) que caracteriza o material e o volume unitário (m^3), sua unidade é expressa em kg/m^3 .

O intervalo de valores de densidade, incluindo-se os metais, mantém uma relação de 1 a 600. Estes variam desde 5 a $30 \text{ kg}/\text{m}^3$ nos isolantes e até $8.900 \text{ kg}/\text{m}^3$ no cobre.

O estudo do comportamento dos materiais em regime dinâmico obriga à introdução de outras características complexas dos mesmos (combinação das características elementares) e que permitem sua caracterização quando estão submetidos às variações cíclicas de clima. Estas três características são: o calor específico volumétrico (ρc), a difusividade térmica (a) e a efusividade térmica (b).

2.5.3 Calor específico volumétrico (ρc):

O calor específico volumétrico (ρc) é o produto entre o calor específico e a densidade e caracteriza a “capacidade térmica volumétrica de um material”.

De acordo com Givoni (1998), é a quantidade de calor requerida para elevar a temperatura de um volume unitário de um material, ou área, por unidade de temperatura.

Materiais com baixa densidade podem ser obtidos pela inclusão de poros na micro-estrutura decorrente das matérias-primas e condições de processamento usualmente empregadas. Isso implica em uma menor transferência de calor, como

por exemplo, no uso do concreto celular e painéis leves de materiais isolantes ou compostos.

2.5.5 Difusividade térmica (a):

A difusividade térmica (a), segundo Givoni (1998), é a razão entre a condutividade térmica a capacidade térmica volumétrica, chamado aqui de calor específico. Esta propriedade trata da noção de velocidade de difusão e é determinada pela equação:

$$a = \lambda/\rho.c$$

Onde:

a= difusividade térmica do material (m²/s);

λ = condutividade térmica do material (W/m. K);

ρ = densidade do material (kg/m³);

c= calor específico do material (J/kg. K).

Conceitualmente a difusividade mostra como se difunde o calor, sendo proporcional à velocidade de propagação de uma onda de temperatura dentro de uma parede ou um teto (CORBELLA E YANNAS, 2003). E é expressa em m²/s.

Segundo Givoni (1998), valores superiores de difusividade resultam em difusões mais rápidas do calor através da massa do material. Geralmente, a difusividade é alta para materiais de condutividade térmica alta e capacidade de armazenamento de calor baixa. Para os materiais de construção mais comuns, o valor da difusividade térmica é na faixa de 5×10^{-7} m²/s. A madeira tem um valor três vezes menor, já o metal tem o valor de difusividade cerca de cem vezes maior que a madeira.

Incropera e Dewitt (1992) cita que esta propriedade mede a relação entre a capacidade do material de conduzir energia térmica e a sua capacidade em acumular energia térmica.

2.5.6 Efusividade Térmica (b):

Segundo Goulart (2004), efusividade térmica relaciona as superfícies mais externas e sua capacidade de conduzir calor, ou seja, a ordem das camadas dos fechamentos influencia na transmissão de calor através dos mesmos. Esta propriedade caracteriza como facilmente o calor pode ser absorvido pela superfície do material e é determinada pela raiz quadrada do produto da condutividade pela capacidade térmica volumétrica.

A efusividade tende a ser alta quando tanto a condutividade térmica quanto a capacidade de armazenamento de calor específico são altas.

O processo inverso também ocorre: quando o ar interno diminui sua temperatura, os materiais com valor “b” elevado lhe entregarão energia, não deixando que o resfriamento seja muito grande. Assim, as oscilações da temperatura são menores. A amplitude será muito menor dentro do ambiente comparada ao exterior (CORBELLA e YANNAS, 2003).

2.5.7 Inércia térmica

Dornelles (2004) descreve a inércia térmica como a capacidade de uma edificação de absorver e libertar calor algum tempo depois, em função da qual pode ocorrer a diminuição de amplitude das temperaturas internas no ambiente construído.

Dois fenômenos de grande importância para o comportamento térmico da edificação estão associados à inércia: o atraso térmico e o amortecimento das amplitudes de temperatura. Ambos terão maior intensidade quanto maior for a inércia térmica da construção.

O atraso térmico consiste no tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor (ABNT, NBR15220-/2005).

Já a capacidade de amortecimento é a propriedade do material que vem a diminuir a amplitude de variações térmicas. É medida pelo coeficiente de

amortecimento (μ), calculado pela razão entre a amplitude de variação da temperatura interna em relação à da temperatura externa, cujos valores são sempre menores do que 1, de modo que podem ser estabelecidas as seguintes relações:

- quanto menor for o valor de μ , maior será a capacidade de amortecimento;
- a capacidade de amortecimento é inversamente proporcional ao coeficiente de condutividade (RIVERO,1985).

As propriedades termofísicas que a determinam a inércia térmica são o calor específico, a condutividade, a difusividade e a efusividade térmicas.

Na Tabela 10, uma listagem dos materiais com suas propriedades térmicas.

Tabela 2.9 – Lista dos materiais e suas propriedades térmicas a temperatura ambiente.

	Material	λ W/mK	ρ kg/m ³	C_p J/kgK	a m ² /s	b J/m ² K/s
1	Poliuretano	0,026	30	1400	6,19E-7	3,30E+1
2	Aire	0,026	1,223	1063	2,02E-5	5,85E+0
3	Poliestireno	0,035	50	1675	4,18E-7	5,41E+1
4	Espuma fenólica	0,038	30	1400	9,05E-7	3,99E+1
5	Lana de vidro	0,041	200	656	3,13E-7	7,33E+1
6	Corcho comprimido	0,085	540	2000	7,87E-8	3,03E+2
7	Mortero de cemento	0,090	1920	669	7,01E-8	3,40E+2
8	Madera de construcción	0,130	630	1360	1,52E-7	3,34E+2
9	Madera de pino	0,148	640	2512	9,19E-8	4,87E+2
10	Madera pesada	0,200	700	1250	2,29E-7	4,18E+2
11	Concreto celular	0,220	600	880	4,17E-7	3,41E+2
12	Tierra con paja	0,300	400	900	8,33E-7	3,29E+2
13	Concreto celular	0,330	800	880	4,69E-7	4,82E+2
14	Yeso	0,488	1440	837	4,05E-7	7,67E+2
15	Mortero cemento/arena	0,530	1570	1000	3,38E-7	9,12E+2
16	Agua	0,582	1000	4187	1,39E-7	1,56E+3
17	Ladrillos de arcilla	0,814	1800	921	4,91E-7	1,16E+3
18	Tierra muro portante	0,850	2000	900	4,72E-7	1,24E+3
19	Vidrio plano	1,160	2490	830	5,61E-7	1,55E+3
20	Arcilla	1,279	1460	879	9,97E-7	1,28E+3
21	Piedra arenisca	1,300	2000	712	9,13E-7	1,36E+3
22	Concreto pesado	1,750	2300	920	8,27E-7	1,92E+3
23	Piedra	1,861	2250	712	1,16E-6	1,73E+3
24	Mármol	2,900	2590	800	1,40E-6	2,45E+3
25	Granito	3,500	2500	754	1,86E-6	2,57E+3
26	Acero	50	7800	512	1,25E-5	1,41E+4
27	Aluminio	160	2800	896	6,38E-5	2,00E+4
28	Cobre	389	8900	385	1,13E-4	3,65E+4
	Máx	389,000	8900	4187	1,13E-4	3,65E+4
	Mín	0,026	1	385	7,01E-8	5,85E+0
	Rango	388,974	8899	3802	1,13E-4	3,65E+4

Fonte: Cruz, 1999.

2.6 Conceitos térmicos fundamentais

Nos itens que compõem essa subseção serão discutidos os conceitos térmicos fundamentais para o entendimento e para a realização dos cálculos que definem o modelo físico em sistemas de aquecimento com energia solar.

2.6.1 Irradiância

Segundo a NBR 15220-1, irradiância é a taxa de radiação solar incidente sobre um corpo, por unidade de superfície (ABNT, 2003). Nos sistemas de aquecimento solar, é imprescindível saber o quanto de energia solar o sistema está recebendo. Para as simulações do presente trabalho foi utilizado os dados de radiação solar fornecidos pelo projeto *Solar and Wind Energy Resource Assesment* (SWERA) e também pelo software Radasol do Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

2.6.2 Transferência de calor por condução, convecção e radiação

Segundo Incropera e Dewitt (2002), transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, obrigatoriamente, transferência de calor, podendo esta ser transferida por condução, convecção e radiação.

2.6.2.1 Condução

Condução está relacionada ao transporte de energia em um meio devido ao gradiente de temperatura, e o mecanismo envolvido é a movimentação aleatória dos átomos ou atividade molecular. Geralmente relacionada à transferência de calor em meios sólidos (INCROPERA e DEWWIT, 2002).

A equação utilizada para quantificar o fluxo de calor por condução em uma superfície é dada por:

$$q''_{cond} = k \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L} [W/m^2] \quad (2.1)$$

Onde:

- q''_{cond} - Fluxo de calor transmitido por condução, $[W/m^2]$;
- k - Coeficiente de transferência de calor por condução, $[W/(m.K)]$;
- $T_{s,1}$ - Temperatura da superfície mais aquecida, $[K]$;
- $T_{s,2}$ - Temperatura da superfície menos aquecida, $[K]$;
- L - Distância entre os pontos com as temperaturas mais e menos aquecidas, $[m]$.

Se o fluxo de calor for multiplicado pela área, chega-se à taxa de calor total transferida $[W]$, logo, para condução, a taxa de calor transferida é dada por:

$$q_{cond} = k \cdot A \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L} [W] \quad (2.2)$$

Onde:

- q_{cond} - Taxa de transferência de calor por condução, $[W]$;
- k - Coeficiente de transferência de calor por condução, $[W/m.K]$;
- $T_{s,1}$ - Temperatura da superfície mais aquecida, $[K]$;
- $T_{s,2}$ - Temperatura da superfície menos aquecida, $[K]$;
- L - Distância entre os pontos com as temperaturas mais e menos aquecidas, $[m]$.
- A - Área, $[m^2]$.

2.6.2.2 Convecção

Definida como a transferência de calor associada a meios fluidos. Em qualquer instante, um grande número de moléculas está se movimentando

coletivamente ou na forma de agregados de moléculas. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor. É comum utilizar o termo convecção quando nos referimos a esse transporte coletivo (INCROPERA e DEWITT, 2002).

Independente das características particulares do processo de transferência de calor, a equação apropriada para a taxa de transferência tem a forma:

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad [W/m^2] \quad (2.3)$$

Onde:

- q''_{conv} - Fluxo de calor transmitido por condução, $[W/m^2]$;
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $[W/m^2.K]$;
- T_s - Temperatura da superfície, $[K]$;
- T_∞ - Temperatura do fluido, $[K]$.

Multiplicando o fluxo de calor pela área, chega-se à taxa de calor transferida por convecção:

$$q_{conv} = \int h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) dA \quad [W] \quad (2.4)$$

Onde:

- q_{conv} - Taxa de transferência de calor por convecção, $[W]$;
- A - Área, $[m^2]$;
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $[W/m^2.K]$;
- T_s - Temperatura da superfície, $[K]$;
- T_∞ - Temperatura do fluido, $[K]$.

O calor transmitido para o fluido depende da vazão mássica do fluido, do calor específico do fluido e das temperaturas de entrada e saída do fluido. Essa relação obedece a seguinte equação (LUYBEN, 1996):

$$q_{conv} = F_0 \cdot C_p \cdot (T_{m,s} - T_{m,e}) \quad [W] \quad (2.5)$$

Onde:

- q_{conv} - Taxa de transferência de calor por convecção, [W];
- F_0 - Fluxo do fluido que circula do subsistema de armazenamento, neste trabalho denominaremos de SSA, para o subsistema de captação de calor, neste trabalho denominaremos, SSCC [m^3/s];
- C_{p_0} - Calor específico à pressão constante do ar que circula no subsistema de armazenamento, SSA, [J/kg. °C];
- $T_{m,s}$ - Temperatura média de saída do fluido, [K];
- $T_{m,e}$ - Temperatura média de entrada do fluido, [K].

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) depende da geometria da superfície, da natureza do movimento do fluido e de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (INCROPERA e DEWITT, 2002).

Incropera e Dewitt (2002) sugere algumas correlações para determinação do coeficiente de transferência por convecção. As correlações apresentadas dependem de parâmetros adimensionais. São eles:

- a) parâmetro adimensional de Reynolds (Re), razão entre as forças de inércia e viscosas, definido por (INCROPERA e DEWITT, 2002):

$$Re = \frac{u \cdot L_p}{\nu} \quad [Adimensional] \quad (2.6)$$

Onde:

- Re - Número de Reynolds, [adimensional];
- u - Velocidade, [m/s];
- L_p - Comprimento da placa coletora, [m];
- ν - viscosidade cinemática, [m^2/s];

- b) parâmetro adimensional de Nusselt (Nu), relacionado ao gradiente de temperatura em uma superfície, definido por:

$$Nu = \frac{(h \cdot L_p)}{k} \quad [Adimensional] \quad (2.7)$$

Onde:

- Nu - Número de Nusselt, [adimensional];
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, [W/m².K];
- L_p - Comprimento da placa coletora, [m];
- k - Coeficiente de transferência de calor por condução, [W/m.K].

c) parâmetro adimensional de Prandtl (Pr), razão entre as absorvidade de momento e térmica, dado por:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad [Adimensional] \quad (2.8)$$

Onde:

- Pr - Número de Prandtl, [adimensional];
- ν - viscosidade cinemática, [m²/s];
- α - Coeficiente de absorção, [adimensional].

Para determinar o fluxo de calor por convecção nos constituintes dos sistemas de aquecimento solares de água devem ser consideradas algumas correlações.

Para escoamentos externos e paralelos em uma placa plana (caso de uma placa coletora solar exposta ao vento) as correlações dependem do tipo de escoamento, Incropera e Dewitt (2002) cita:

a.1) para escoamento laminar, $Re \leq 10^7$ e $Prandtl \geq 0,6$, tem-se:

$$Nu = \frac{(h \cdot L_p)}{k} = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad [adimensional] \quad (2.9)$$

Onde:

- Nu - Número de Nusselt, [adimensional];
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, [W/m². K];
- L_p - Comprimento da placa coletora, [m];
- Re - Número de Reynolds, [adimensional];
- Pr - Número de Prandtl, [adimensional];
- k - Coeficiente de transferência de calor por condução, [W/m.K].

a.2) para escoamento turbulento $Re \geq 10^7$ e $0,6 < Prandlt \leq 0,6$:

$$Nu = \frac{(h \cdot L_p)}{k} = 0,0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad [adimensional] \quad (2.10)$$

Onde:

- Nu - Número de Nusselt, [adimensional];
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $[W/m^2 \cdot K]$;
- L_p - Comprimento da placa coletora, $[m]$;
- Re - Número de Reynolds, [adimensional];
- Pr - Número de Prandlt, [adimensional];
- k - Coeficiente de transferência de calor por condução, $[W/m^2 \cdot K]$.

2.6.2.3. Radiação

É a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura finita. Enquanto a transferência de calor por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele (INCROPERA e DEWITT, 2002).

A radiação que é emitida por uma superfície tem sua origem na energia cinética dos átomos que compõem o material. O fluxo de calor emitido por uma superfície é dado por:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad [W/m^2] \quad (2.11)$$

Onde,

- E – Fluxo de calor emitido pela superfície $[W/m^2]$;
- ε – Propriedade radiante da superfície denominada emissividade. Com valores na faixa de entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Ela depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento (grandeza adimensional).
- σ – Constante de Stefan – Boltzmann possui o valor de $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$;

A radiação pode ser oriunda de uma fonte especial, como o Sol, ou de outra superfície que esteja no campo de visão da superfície exposta. Independente das fontes designa-se a taxa na qual todo tipo de radiação incide sobre uma unidade de área como irradiância (G).

Uma parte da radiação incidente, ou toda ela, pode ser absorvida pela superfície, aumentando dessa forma a energia térmica do material. A taxa na qual a energia radiante é absorvida por unidade de área pode ser avaliada a partir do conhecimento de uma propriedade radiante da superfície denominada absortância (α). Logo:

$$G_{abs} = G_{inc} \cdot \alpha \quad [W/m^2] \quad (2.12)$$

Onde:

- G_{abs} - Irradiação solar absorvida, $[W/m^2]$;
- G_{inc} - Irradiação solar incidente, $[W/m^2]$;
- α – Propriedade radiante da superfície denominada absortancia. Determina o quanto da irradiação incidente foi absorvida. Depende da natureza da irradiação, do material e acabamento da superfície.

O fluxo de calor por radiação é definido então pela diferença entre as energias emitida e recebida por radiação. Logo a expressão para o fluxo de calor por radiação é a seguinte:

$$q''_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad [W/m^2] \quad (2.13)$$

Onde:

- q''_{rad} - Fluxo de calor transmitido por radiação, $[W/m^2]$;
- ε - Emissividade, [adimensional];
- σ - Constante de Stefan – Boltzmann, possui o valor de $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$;
- T_s^4 – Temperatura da superfície [K];
- T_{viz}^4 - Temperatura da vizinhança [K].

Se o fluxo de calor for multiplicado pela área, obtém-se a taxa de calor total transferida $[W]$, logo para radiação a taxa de calor transferida é dada por:

$$q_{rad} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad [W] \quad (2.14)$$

Onde:

- q_{rad} - Taxa de transferência de calor por radiação, $[W]$;
- A - Área, $[m^2]$;
- ε - Emissividade, $[adimensional]$;
- σ - Constante de Stefan – Boltzmann, possui o valor de $5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$;
- T_s^4 – Temperatura da superfície $[K]$;
- T_{viz}^4 - Temperatura da vizinhança $[K]$.

2.6.3 Determinação do fluxo de calor baseado em resistências térmicas

Um método muito utilizado para se determinar o fluxo de calor que passa por uma superfície é a consideração de semelhança com as resistências térmicas. Nesse método compara-se a difusão de calor com a difusão da carga elétrica. Assim como uma resistência elétrica é associada com uma condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada com a condução de calor. Cria-se um circuito térmico e associam-se as respectivas equações.

Segundo Incropera e Dewitt (2002), a resistência térmica para a transferência de calor por condução em uma parede plana é dada por:

$$R_{t,cond} \equiv \frac{L}{k \cdot A} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q''_{cond}} \quad [Adimensional] \quad (2.15)$$

Onde:

- $R_{t,cond}$ - Resistência térmica condução $[adimensional]$;
- L - Distância entre os pontos com as temperaturas mais e menos aquecida, $[m]$;

- k - Coeficiente de transferência de calor por condução da superfície ou parede, $[W/m.K]$;
- A - Área, $[m^2]$;
- $T_{s,1}$ - Temperatura da superfície mais aquecida, $[K]$;
- $T_{s,2}$ - Temperatura da superfície menos aquecida, $[K]$;
- q''_{cond} - Fluxo de calor transmitido por condução, $[W/m^2]$.

Analogamente uma resistência térmica também pode estar associada com a transferência de calor por convecção em uma superfície, e é dado por Incropera e Dewitt (2002):

$$R_{t,conv} \equiv \frac{1}{h \cdot A} = \frac{T_s - T_\infty}{q''_{conv}} \quad [Adimensional] \quad (2.16)$$

Onde:

- $R_{t,conv}$ - Resistência térmica convecção $[Adimensional]$;
- L - Distância entre as temperaturas mais e menos aquecida, $[m]$;
- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $[W/m^2.K]$;
- A - Área, $[m^2]$;
- T_s - Temperatura da superfície, $[K]$;
- T_∞ - Temperatura do fluido, $[K]$;
- q''_{conv} - Fluxo de calor transmitido por convecção, $[W/m^2]$.

Ainda há outra resistência referente à transferência de calor por radiação, que é dada por:

$$R_{t,rad} \equiv \frac{1}{h_r \cdot A} = \frac{T_s - T_{viz}}{q''_{rad}} \quad [adimensional] \quad (2.17)$$

Onde:

- $R_{t,rad}$ - Resistência referente à transferência de calor por radiação $[adimensional]$;
- h_r - Coeficiente de transferência de calor por radiação do, $[W/m^2.K]$;
- A - Área, $[m^2]$;

- q''_{rad} - Fluxo de calor transmitido por radiação, [W/m^2];
- T_s - Temperatura da superfície, [K];
- T_{viz} - Temperatura da vizinhança, [K].

2.6.4 Eficiência dos sistemas de aquecimento solar de água

Neste trabalho, as partes do sistema de aquecimento da água para consumo, serão nomeadas como SSP e SSR significando respectivamente, subsistema de painel solar e no subsistema de reservatório térmico.

Para o cálculo da eficiência dos sistemas de aquecimento de água, Kalogirou (2009) propõe a seguinte equação:

$$\eta = \frac{Q_u}{(A_c \cdot G_{inc})} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.18)$$

Onde:

- η - Eficiência, [*adimensional*];
- Q_u - Energia térmica que efetivamente chega até a água, [W];
- A_c - Área coletora nominal, [m^2];
- G_{inc} - Irradiância solar incidente, [W/m^2].

Parte da irradiância que chega ao coletor é transmitida ao fluido de trabalho, e o restante é perdido para o meio, logo se conclui que:

$$Q_u = (G_{inc} \cdot \alpha \cdot A_c) - (Q_{pp} + Q_{pr}) \text{ [W]} \quad (2.19)$$

Onde:

- Q_u - Energia térmica que efetivamente chega até a água, [W];
- G_{inc} - Irradiância solar incidente, [W/m^2];
- α - Absortividade, [*Adimensional*];
- A_c - Área coletora nominal, [m^2];
- Q_{pp} - Perdas de calor nas placas do SSC, [W];

- Q_{pr} - Perdas de calor nas placas do SSA, [W].

Juntando as expressões (2.18) e (2.19) chega-se a expressão para o cálculo da eficiência dos sistemas de aquecimento solar:

$$\eta = \frac{(G_{inc} \cdot \alpha \cdot A_c) - (Q_{pp} + Q_{pr})}{(A_c \cdot G_{inc})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.20)$$

Onde:

- η - Eficiência, [Adimensional];
- G_{inc} - Irradiação solar incidente, [W/m^2];
- α - Absortividade, [Adimensional];
- A_c - Área coletora nominal, [m^2];
- Q_{pp} - Perdas de calor nas placas do SSC, [W];
- Q_{pr} - Perdas de calor nas placas do SSA, [W];

2.7 Modelos Matemáticos para simulação do fluxo de calor em sistemas de calefação e aquecimento de água

Segundo Dechechi (2010), a necessidade de aprimoramento em modelagem matemática de processos se firmou com o grande desenvolvimento das estratégias de controle de processos. Através de uma modelagem representativa de um processo podemos realizar simulações e analisar o seu comportamento dinâmico e estacionário, sendo então possível avaliar diversas características tais como estabilidade, desempenho, eficiência, oscilações, etc. De posse da modelagem matemática e de um programa computacional que a resolva, é possível simular condições reais de um processo conhecendo o comportamento dinâmico do mesmo, sem depender de recursos materiais.

Embora a modelagem matemática aplicada a um processo possa trazer muitos benefícios ao desenvolvimento da melhor estratégia de controle a ser aplicada, uma crescente complexidade nestes modelos, para que estes se tornem cada vez mais representativos, trazem inerentemente complicações de resolução em tempo real através de computadores. Mesmo com o crescente desenvolvimento

das tecnologias de processadores digitais, e seu barateamento associado, em casos práticos, normalmente é necessário analisar as formas de simplificação dos modelos matemáticos obtidos. Isto se deve a nem sempre se dispor de ferramentas confiáveis para resolução destes em tempo real (DECHECHI, 2010).

Para realizar a modelagem matemática é necessária a utilização de equações matemáticas que representem o sistema físico real. Para o caso dos sistemas de aquecimento solares convencionais a Lei da Continuidade e a Equação da Energia fornecem base para o início da construção do modelo físico.

2.7.1 Lei da Continuidade

Segundo Luyben (1996), a Lei da Continuidade, também conhecida como balanço de massa quando aplicada a sistemas dinâmicos afirma: o fluxo de massa que entra no sistema menos o fluxo de massa que sai do sistema é igual a taxa de variação de massa dentro do sistema.

Logo para um sistema de uma entrada e uma saída chegamos à seguinte expressão:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = F_{in}\rho_{in} - F_{out}\rho_{out} \quad (2.21)$$

Onde:

- F_{in} - Fluxo de fluido de entrada, $[m^3/s]$;
- ρ_{in} - Densidade do fluido de entrada, $[kg/m^3]$;
- F_{out} - Fluxo de fluido de saída, $[m^3/s]$;
- ρ_{out} - Densidade do fluido de saída, $[kg/m^3]$.
- ρ - Densidade do fluido do sistema, $[kg/m^3]$.
- V - Volume de fluido no sistema, $[m^3]$.

2.7.2 Equação da Energia

Conforme Luyben (1996), a Equação da Energia aplicada a sistemas dinâmicos afirma: o fluxo de energia que entra no sistema menos o fluxo de energia

que sai do sistema mais o calor adicionado mais o calor gerado menos o calor perdido menos o trabalho realizado é igual a taxa de variação de energia do sistema. Logo, para um sistema de uma entrada e uma saída tem-se a expressão:

$$F_{in}\rho_{in}(U_0 + K_0 + \phi_0) - F_{out}\rho_{out}(U + K + \phi) + Q_g + Q_e - Q_p - (W + F_{out}\cdot P - F_{in}\cdot P_0) = \frac{d}{dt}[(U + K + \phi)V\cdot\rho_s] \quad (2.22)$$

Onde:

- F_{in} - Fluxo de fluido de entrada, [m^3/s];
- ρ_{in} - Densidade de fluido de entrada, [kg/m^3];
- F_{out} - Fluxo do fluido de saída, [m^3/s];
- ρ_{out} - Densidade do fluido de saída, [kg/m^3];
- ρ_s - Densidade do fluido do sistema, [kg/m^3];
- U_0 - Energia Interna do fluido que entra no sistema de entrada (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- K_0 - Energia Cinética de entrada (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- ϕ_0 - Energia Potencial de entrada (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- U - Energia Interna final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- K - Energia Cinética final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- ϕ - Energia Potencial final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- Q_g - Energia térmica gerada, [W];
- Q_e - Energia térmica que entra no sistema, [W];
- Q_p - Perdas de calor do sistema, [W];
- W - Trabalho, [W];
- F - Vazão volumétrica de saída, [m^3/s];
- P - Pressão de saída do sistema, [N/m^2];
- P_0 - Pressão de entrada do sistema, [N/m^2];
- F_0 - Fluxo de água que circula do SSA para o SSC, [m^3/s];
- t - Tempo [s];
- V - volume contido no interior do sistema, [m^3].

3 DESENVOLVIMENTO DO ANTEPROJETO

Este capítulo apresenta as discussões a cerca de definições sobre o anteprojeto do sistema combinado considerando sua implantação em uma edificação modelo, levando em consideração as condicionantes do projeto e considerando as diversas etapas do processo de captação e utilização da energia solar.

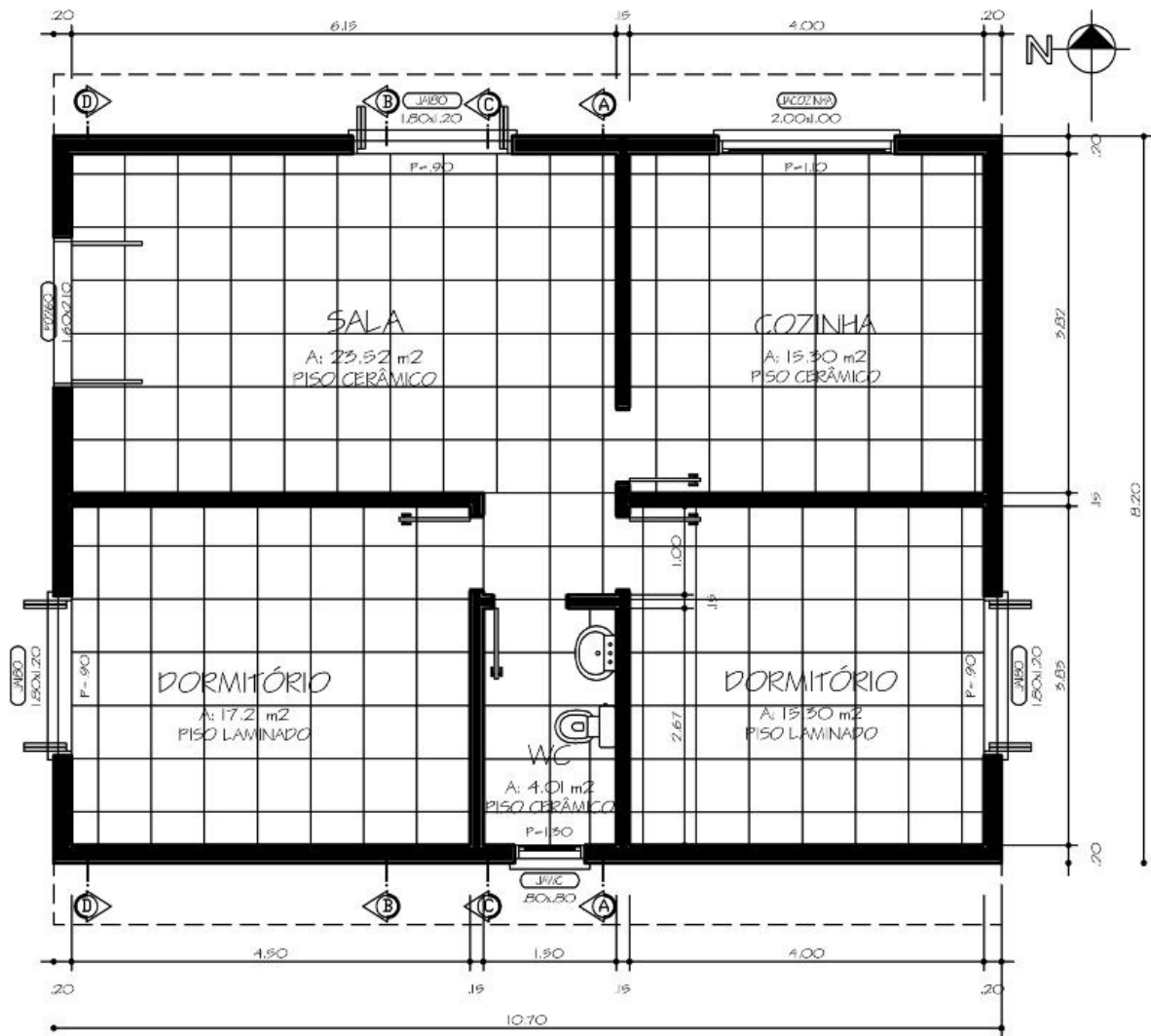
3.1 Edificação modelo considerada para implantação do sistema combinado

Para possibilitar os cálculos de eficiência do sistema, foi necessário o desenvolvimento de um projeto modelo.

O modelo adotado consiste em uma edificação residencial com características construtivas típicas da região da cidade de Santa Maria – RS. A Figura 3.1 apresenta uma perspectiva da edificação, enquanto a Figura 3.2 apresenta a planta baixa e a Figura 3.3 um corte.



Figura 3.1 – Perspectiva da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.



PLANTA BAIXA
SEM ESCALA

Figura 3.2 – Planta da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.

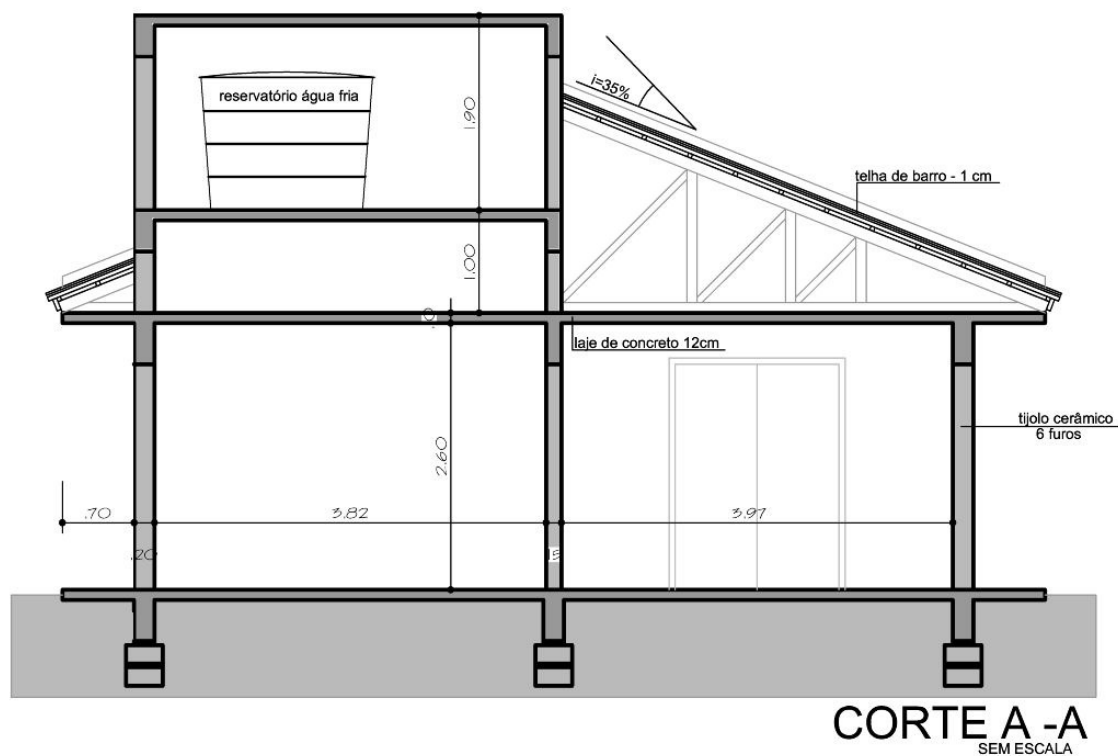


Figura 3.3 – Corte c - c da edificação utilizada para dimensionamento do sistema combinado.

A Tabela 3.1 apresenta os materiais que foram considerados na 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. Para as características térmicas, assumiu-se os valores constantes da NBR 15220-2.

Tabela 3.1– Materiais componentes da edificação e suas características térmicas

Componente da edificação		Materiais utilizados		Características Térmicas	
		Composição dos materiais	Espessura total (cm)	Transmitância Térmica (U) (W/m ² .K)	Capacidade Térmica (C _T) (kJ/(m ² .K))
Envoltória	Paredes externas	tijolo cerâmico 6 furos circulares (10x15x20cm) espessura argamassa de revestimento de 2,5cm espessura argamassa de assentamento de 1cm	20	2,5	>130
	Cobertura	telha de barro, lâmina de alumínio polido e laje mista espessura da telha de 1cm espessura laje de 12cm	variável	2,3	113
divisórias internas	Paredes internas	tijolo cerâmico 6 furos circulares (10x15x20cm) espessura argamassa de revestimento de 2,5cm espessura argamassa de assentamento de 1cm	15	2,28	168
Aberturas	Janela	vidro simples	0,3	4,7	-
	Porta	madeira maciça	4	2,7	-

3.2 Condicionantes impostos ao projeto

Para que fosse possível a definição do pré-projeto foram considerados alguns condicionantes como: fatores ambientais, fatores impostos pelo projetista e características dos materiais a serem empregados.

a) condicionantes ambientais: como o sistema proposto utiliza a energia solar como principal fonte de energia é indispensável considerar os fatores climáticos da região que foi adotada para os estudos do sistema, nesse caso a cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Os fatores a serem considerados são: a radiação solar disponível, a quantidade de horas de radiação solar, a trajetória aparente do sol e a temperatura externa. Essas condicionantes influenciam diretamente nas trocas de energia térmica envolvidas, sendo de fundamental importância para o dimensionamento dos subsistemas. Além disso deve ser considerada a grande variação térmica da região considerada para o estudo, durante os períodos do ano e no decorrer de um dia, fazendo-se assim necessário considerar que um bom sistema de aquecimento deve armazenar energia térmica para os períodos de baixa ou nenhuma insolação, como acontece nos dias nublados e também durante a noite. Este sistema deve fazer com que a grande oscilação climática seja amenizada no interior da edificação, para que a temperatura interna de conforto, a qual os ocupantes estão sujeitos, seja o mais homogênea possível.

b) condicionantes impostos pelo projetista: a premissa inicial a ser considerada foi a criação de um sistema que pudesse tornar as edificações mais sustentáveis e termicamente mais confortáveis. Para tanto foi considerado importante a utilização da própria estrutura da edificação para captação de energia, assim diminuindo o gasto com materiais e reduzindo o entulho pós “ciclo de vida” desse sistema. Para o coletor, também foi considerado como fator importante a escolha de materiais conhecidos, como o concreto e o vidro, facilmente encontrados e de custo relativamente baixo. Outro fator considerado relevante foi a manutenção da estética considerada aceitável dentro dos padrões normais das edificações. Esses condicionantes foram considerados de forma que o sistema proposto possa vir a ser aplicado facilmente a diferentes processos construtivos de edificações.

c) características dos materiais empregados: a escolha dos materiais empregados é de suma importância nos sistemas de condicionamento térmico em

edificações. Além dos materiais possuírem características térmicas adequadas, é necessário que eles resistam à ação das intempéries e aos esforços aos quais serão submetidos, para que tenham uma longevidade semelhante aos demais materiais tipicamente utilizados em edificações.

- Características térmicas dos materiais: Definição dos materiais para cada parte do sistema de maneira a adequar suas propriedades térmicas às expectativas e necessidades de desempenho avaliadas dos mesmos dentro do conjunto. Nesse item as principais características térmicas consideradas foram: condutividade térmica; densidade; calor específico; calor específico volumétrico; capacidade térmica; difusividade e efusividade térmica;

- Propriedades mecânicas dos materiais: Além de possuir bom desempenho térmico, os materiais precisam resistir às solicitações de esforços para cada função desempenhada;

- Pré-dimensionamento dos materiais: definição inicial de áreas, espessuras e posicionamento de cada material.

3.3 Descrição física do sistema combinado proposto

A definição do sistema do sistema combinado de aquecimento de ambientes e água teve como limitações os condicionantes impostos citados anteriormente, sendo o projeto pensado basicamente como tendo um elemento de captação da energia solar, a qual é então utilizada para duas finalidades simultâneas condicionamento térmico e aquecimento de água. Finalidades as quais, neste trabalho denominamos subsistema de aquecimento de ambientes e subsistema de aquecimento de água de consumo, que são apresentados neste item do trabalho.

O estudo preliminar do sistema combinado foi desenvolvido através de desenhos e projetos iniciais da captação de energia solar e dos subsistemas de aquecimento de água e calefação. A Figura 3.4 ilustra a interligação dos subsistemas, formando o sistema combinado.

Captação de energia solar: é responsável pela coleta da energia solar que abastece todo o sistema.

Subsistema de aquecimento de água: é responsável pelo aquecimento da

água para consumo, sendo subdividido no subsistema de painel solar (SSP) e no subsistema de reservatório térmico (SSR).

Subsistema de calefação: é responsável pela utilização da energia solar para calefação dos ambientes no período frio, sendo subdividido em subsistema de captação de calor (SSCC) e subsistema de armazenamento (SSA), tem como finalidade levar até os cômodos da edificação a energia térmica coletada na cobertura, aquecendo o ar. Esse mesmo subsistema é responsável pela exaustão da edificação nos períodos de calor. Todo esse processo é automatizado em função da comparação entre as temperaturas do ar aquecido e dos ambientes internos, de forma a obter as melhores condições de conforto térmico aos ocupantes.

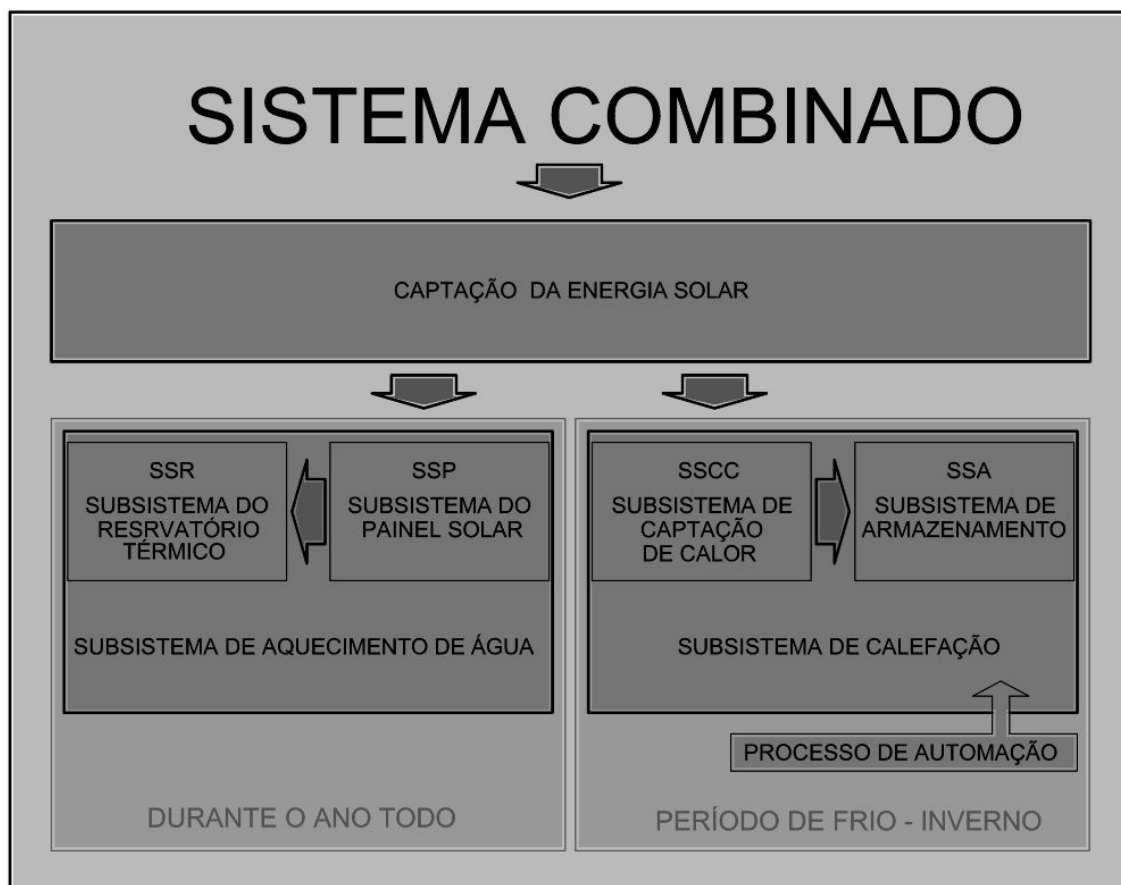


Figura 3.4 – Esquema de interligação dos subsistemas que formam o sistema combinado.

A Figura 3.5 mostra a composição volumétrica da edificação para qual foi estudada a implementação do sistema combinado proposto.

A cobertura foi escolhida para captar a energia solar, visto que é o elemento que recebe maior carga térmica nas edificações térreas. Para a captação de energia solar foi criado um compartimento térmico com cobertura envidraçada, a qual permite a entrada mais intensa da energia solar incidente na cobertura ao mesmo tempo em que reduz as perdas por convecção.

A energia recolhida por esse sistema terá dois aproveitamentos distintos: parte da energia será utilizada para aquecer água para o consumo, e outra parcela da energia terá aproveitamento para aquecimento do ar que será insuflado como calefação nos diversos cômodos da edificação.



Figura 3.5 – Composição da edificação.

Nas Figuras 3.6 e 3.7 é possível verificar de forma esquemática a disposição desses sistemas na edificação.

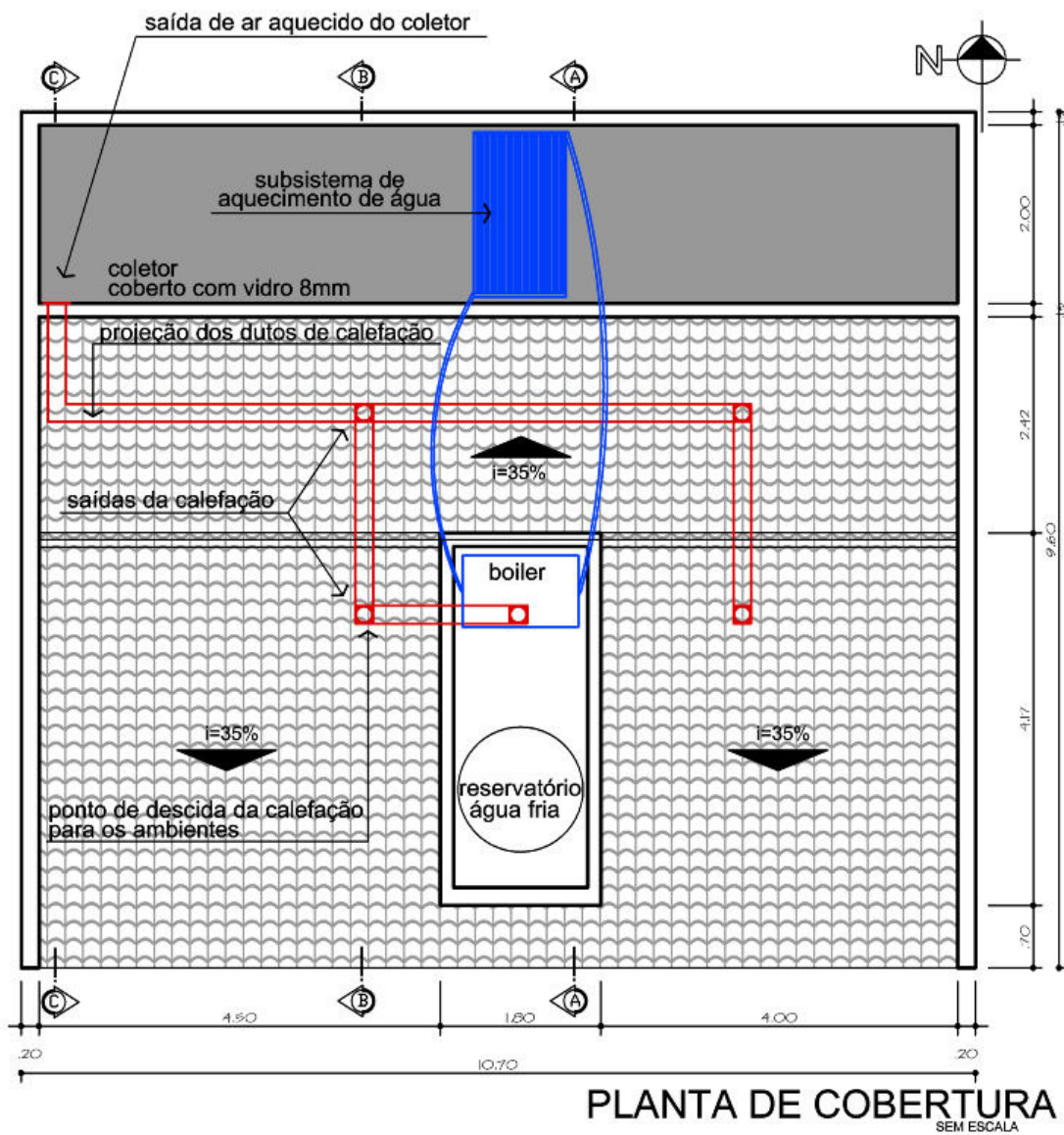


Figura 3.6 – Disposição dos subsistemas na cobertura.

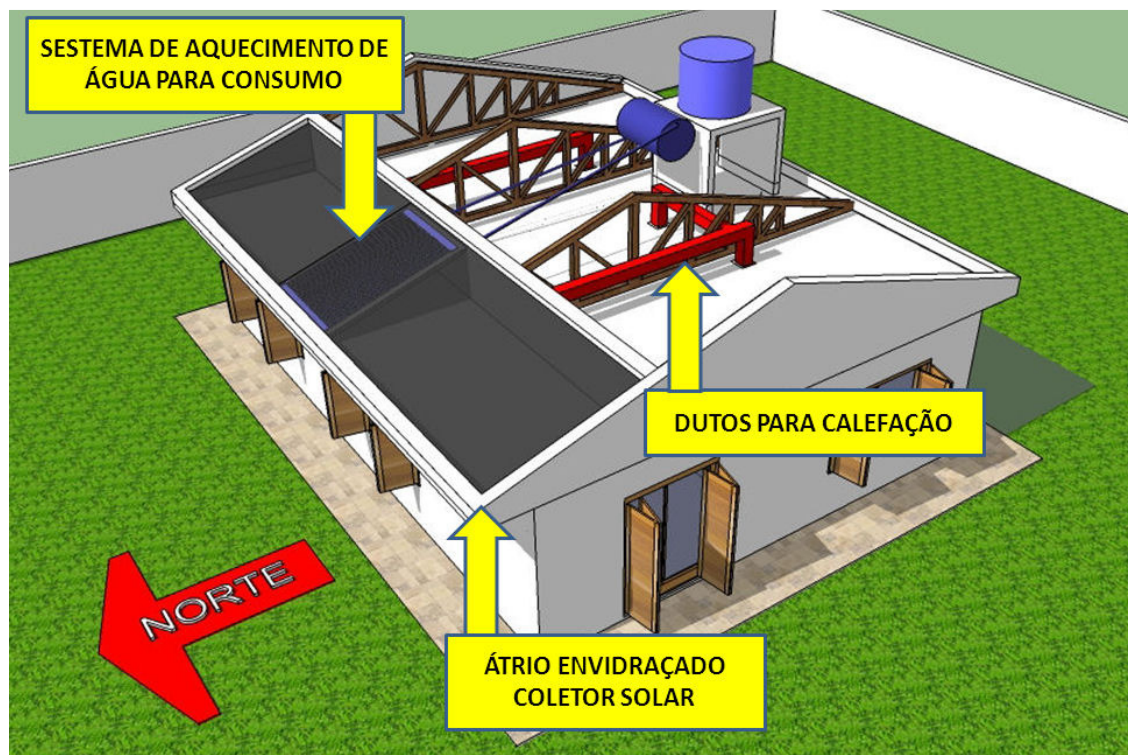


Figura 3.7 – Disposição do sistema combinado proposto na residência.

3.3.1 Captação da energia solar

Para a captação de energia solar foi escolhido o espaço que fica entre a laje de forro e a cobertura da edificação, denominado ático, sendo delimitado um volume do mesmo para que funcione como coletor e acumulador de calor. Essa escolha foi feita visando a redução de recursos materiais para atender apenas a função do sistema, diminuindo o impacto ambiental do mesmo. Assim, utilizando o corpo do edifício como parte do sistema, é possível reduzir a quantidade de materiais a serem utilizados e reduzir o “entulho” depois que a edificação completar o seu ciclo de vida.

A posição do painel voltado para o Norte foi escolhida para a maior captação de radiação solar considerando-se o hemisfério sul. Nesta posição as superfícies que absorvem a maior quantidade de energia solar durante o ano inteiro são as inclinadas para o norte. De acordo com Lamberts et al (2010), para definir a inclinação da cobertura, favorecendo o ganho de energia solar durante os meses de inverno, a inclinação em relação a horizontal deve ser um pouco mais inclinada que a latitude local. A cidade de Santa Maria encontra-se na latitude geográfica igual a $-29^{\circ} 41' 03''$, então se determinou que a inclinação para todo o telhado fosse igual a

35%.

No coletor, são substituídas as telhas da cobertura por um fechamento em vidro 8mm, permitindo que a radiação solar incida diretamente no seu interior. A presença do vidro cria o “efeito estufa” e impede as perdas por convecção, que neste caso, seriam as perdas de energia mais significativas, devido às correntes de ar externas ao sistema.

Para o espaço do coletor solar será utilizado todo o comprimento da edificação. O tamanho do painel absorvedor resultou então em uma área de aproximadamente 21,4m², sendo que 2m² do interior deste compartimento são ocupados pelos painéis solares que fazem parte do subsistema de aquecimento de água.

O material escolhido para fazer os fechamentos laterais e inferior do ático envidraçado, que neste trabalho denominaremos “coletor solar”, é o concreto, com acabamento interno em tinta preta fosca para aumentar o coeficiente de absorção e diminuir a porcentagem de reflexão. As faces externas do fechamento em concreto serão revestidas por material térmico, lã de vidro com acabamento aluminizado, para diminuir as perdas, melhorando a eficiência do sistema.

A radiação solar coletada aquece o ar interno e é acumulada por inércia térmica nos fechamentos laterais em concreto. Este material foi escolhido por sua alta capacidade térmica de armazenamento de energia.

As características da cobertura e suas dimensões e materiais utilizados no coletor de captação e armazenamento da energia solar estão listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Materiais e características da cobertura

Materiais	Característica/dimensão
Material acumulador de calor	Concreto
Vidro de vedação comum	8mm
Largura da Placa (L_p)	2m
Comprimento da placa absorvedora (vidro)	10,3 m
Área Coletora nominal (A_p)	21,4 m ²
Material isolante térmico	Manta de lã de vidro aluminizada

A energia térmica captada será aproveitada de duas formas:

- Aquecimento de água de consumo que será realizado pela instalação de um painel de aquecimento no coletor solar, que trabalha em regime aberto aquecendo a água do reservatório;
- Aquecimento por calefação dos ambientes que será realizado pela passagem do ar pelo subsistema de captação de energia, onde será aquecido antes de ser insuflado nos diversos ambientes da edificação.

3.3.2 Subsistema de aquecimento de água

O subsistema de aquecimento de água SSA, foi pensado visando a aproveitar parte da energia coletada para aquecer a água de consumo. Ele é subdividido em subsistema de painel solar (SSP) e pelo subsistema de reservatório térmico (SSR).

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. A disposição desse subsistema no telhado é representada na Figura 3.8.

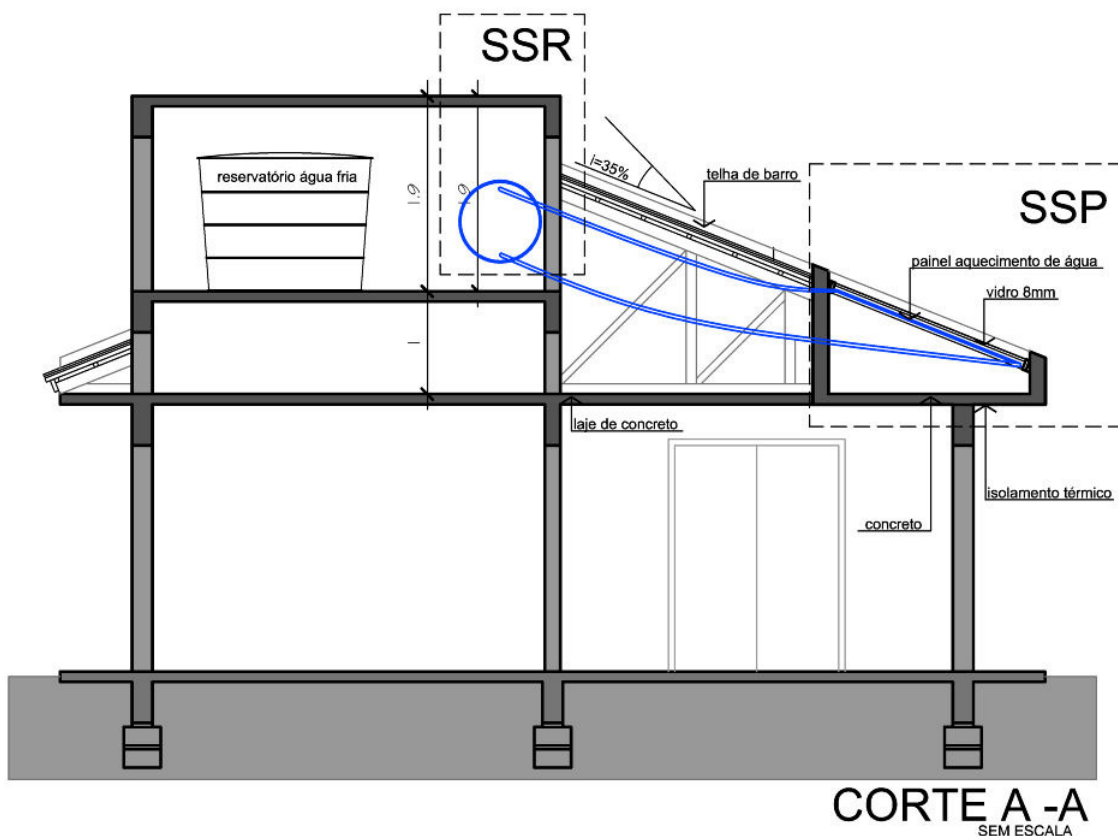


Figura 3.8 – Corte A-A evidenciando o sistema de aquecimento de água.

Para o aquecimento da água de consumo é necessário que a energia coletada no painel seja transportada até o reservatório. Para tanto, 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.

Serão utilizadas 2 placas de 1m^2 cada, sendo estas compostas por uma caixa isolada termicamente nas suas faces laterais e na parte inferior, sendo a parte superior composta por vidro para permitir a passagem da radiação solar ao interior e diminuir as perdas de calor para o meio externo. No interior dessa caixa, a radiação solar é captada por uma serpentina de cobre, material este de uso consolidado em sistemas de aquecimento de água com bom desempenho em coletores solares, pois, a alta condutividade térmica deste material permite transferir rapidamente o calor do meio para o líquido circulante.

As placas utilizadas nos cálculos são da marca Soletrol, sendo do modelo Soletrol Max Mini Cobre®. A Figura 3.9 mostra a foto retirada do site do fabricante, e as características do painel estão listadas na Tabela 3.3.



Figura 3.9 – Placa coletora solar modelo Soletrol Max Mini Cobre®

Fonte: Soletrol, 2011.

Tabela 3.3 – 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 ²
Altura da placa	0,05 m
Possui cobertura de vidro	SIM
Comprimento total dos tubos internos (C_1)	26 m

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 3.4.

Tabela 3.4 – 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

A movimentação da água entre o painel e o reservatório pode ser de duas formas, pelo uso de uma bomba ou natural, por termossifão. Para que o fenômeno de convecção natural dos fluidos aconteça, é necessária a existência uma diferença de altura de 30 a 60 centímetros entre o painel e o reservatório e também uma diferença de temperatura. Outra forma de movimentar esse líquido é por meio de uma bomba, que pode ser comandada por um sistema de controle automático (o comando diferencial).

Neste trabalho foi definido o uso de uma bomba para fazer a movimentação da água de consumo entre o painel solar e o reservatório. O sistema de controle está regulado de modo a iniciar o funcionamento da bomba logo que a diferença de temperatura entre os coletores e o depósito seja de 5 °C. Seu uso aumenta o rendimento já que torna o fluxo mais efetivo.

Como reservatório térmico de água foi escolhido um modelo encontrado comumente no mercado nacional, isso para facilitar os cálculos, posteriormente pode ser estudada a troca do boiler por um reservatório alternativo para o sistema.

No projeto da edificação foi considerada uma população de quatro pessoas, tomando como base o número médio de pessoas nas famílias brasileiras. Para o cálculo de água quente foram consultadas as tabelas da NBR 128 (ABNT, 1963), sendo considerados 45 litros diários de água quente por pessoa. Dessa forma o tamanho de reservatório escolhido foi 200 litros ($0,2\text{m}^3$), estando prevista sua instalação na cobertura da edificação, próximo ao reservatório de água fria.

O modelo de reservatório térmico escolhido é o Superboiler Soletrol Max,

conforme a Figura 3.10, suas principais características são descritas na Tabela 3.5. Este modelo de *boliler* é cilíndrico e deve ser posicionado na horizontal.



Figura 3.10 – Reservatório térmico escolhido: Superboiler Soletrol Max.

Fonte: Soletrol, 2011.

Tabela 3.5 – Características do reservatório térmico Modelo Superboiler Soletrol Max®

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

Fonte: SOLETROL (2011).

Para garantir que a água quente de consumo sempre atinja a temperatura adequada, deve ser previsto um sistema auxiliar de aquecimento da água para

períodos de pouca radiação solar.

Para este trabalho foi escolhido o uso da ducha Corona Flex Eletrônica, considerando um menor desperdício de energia elétrica e de água. A ducha liga automaticamente na falta de água quente aos 30°C do aquecedor ou enquanto a água quente do boiler ainda não chegou ao chuveiro, evitando o desperdício de água no banho. Também desliga automaticamente quando a temperatura da água chega ao nível desejado.

3.3.3 Subsistema de calefação de ambientes

O subsistema de calefação é subdividido em dois, o subsistema de captação de energia o (SSCC), e o subsistema de armazenamento (SSA), considerado como sendo toda a parte interna da residência. Por meio deste subsistema uma parcela da energia solar captada será utilizada para o condicionamento térmico da edificação, atuando de formas distintas nas diferentes estações climáticas, inverno e verão. 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 de automação. 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 que é acionado de forma automatizada de acordo com as variáveis climáticas do dia e tendo como parâmetro temperaturas fixas de conforto térmico. Este exaustor é responsável pelo insuflamento do ar aquecido nos cômodos da edificação.

As temperaturas assumidas de conforto interno nas edificações são tabeladas pela NBR 6401 (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.

A Figura 3.11 mostra o percurso do ar aquecido dentro do sistema.

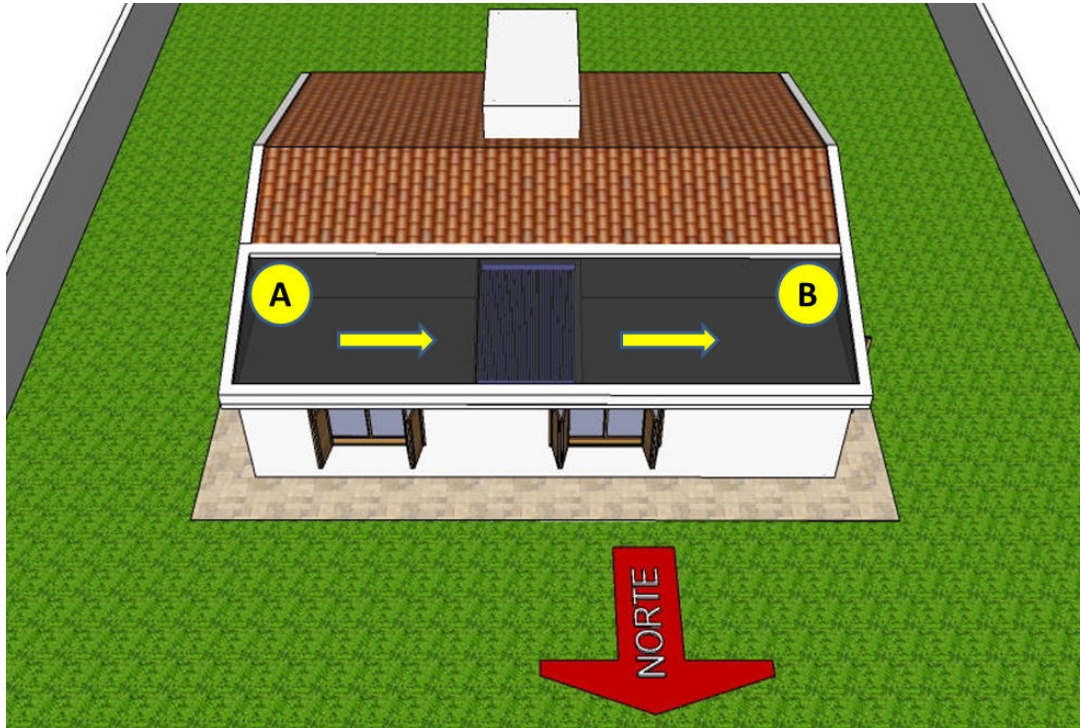


Figura 3.11 – Circulação do ar dentro da cobertura.

A temperatura de conforto da edificação é obtida pelo ar aquecido que é insuflado nos cômodos e pelo ganho nas paredes leste e oeste da edificação, que recebem radiação solar diretamente do sol ao amanhecer e no final da tarde respectivamente. 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. Dessa forma a temperatura interna se mantém com menores variações, favorecendo o conforto do usuário, principalmente em regiões como a de Santa Maria, com grande amplitude térmica ao longo do dia e mudanças bruscas de temperatura no decorrer do ano.

A massa de ar presente no ático envidraçado (coletor solar) aquece recebendo carga térmica diretamente do sol, e também o calor recebido pelos fechamentos laterais que são aquecidos pela radiação solar. Esse ar aquecido posteriormente é insuflado nos ambientes da edificação por ação de um exaustor que controla a vazão de ar no ponto “B”. A interligação desses sistemas pode ser melhor compreendida na Figura 3.12.

O insuflamento do ar da calefação é controlado manualmente no interior do ambiente, graduando-se sua vazão de acordo com as necessidades de aquecimento

de cada usuário. Pela existência desse controle, é possível deixar o sistema fechado em um determinado ambiente, assim maximizando o aquecimento nos demais cômodos.

Para o cálculo de rendimento do sistema o interior da residência é calculado sendo considerado um acumulador de calor, nomeado neste trabalho como subsistema de armazenamento de energia SSA. O ar aquecido por receber carga térmica solar entra nesse acumulador, letra “A” na Figura 3.11, aquece os fechamentos e retorna para o coletor, marcada com a letra “B” na Figura 3.11, no qual receberá mais carga térmica reaquecendo, assim fazendo o sistema funcionar de forma cíclica.

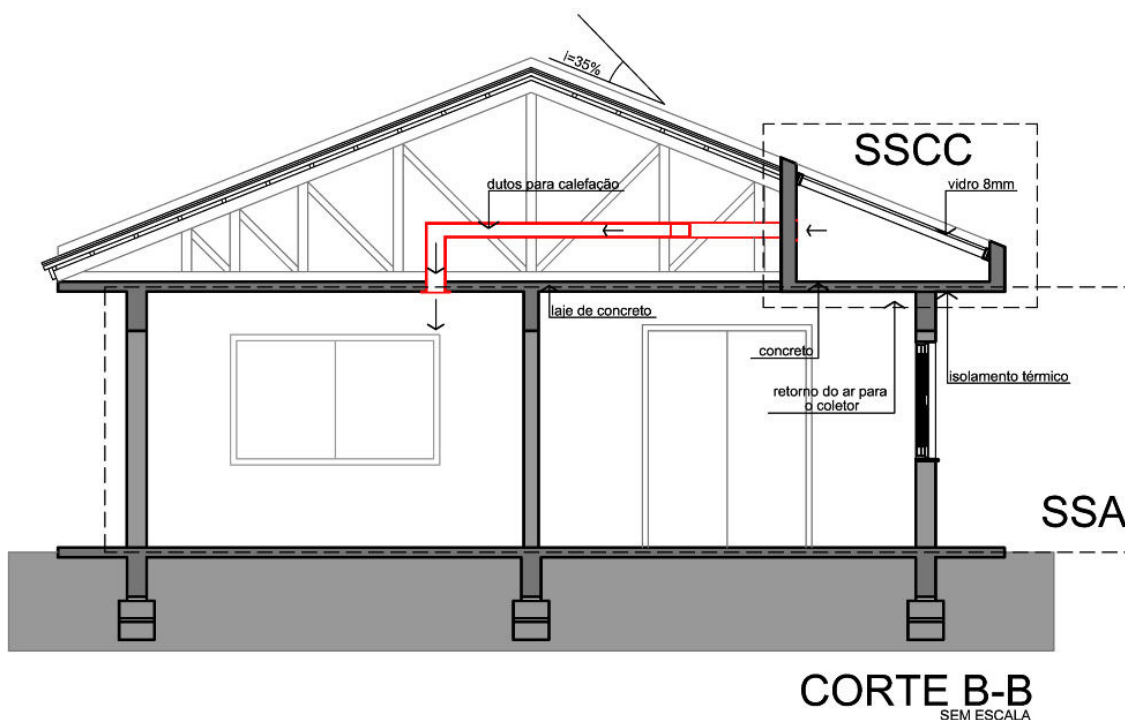


Figura 3.12 – Corte B-B evidenciando os subsistemas da calefação.

O fluxo do ar torna o ambiente da casa mais saudável tendo em vista que ao passar pelo átrio envidraçado a radiação ultravioleta dos raios solares, que tem um efeito germicida, promove a desinfecção e higienização do ar, pois, destroem bolores, vírus e bactérias. No bocal de saída do ar em cada cômodo é acoplado um filtro, que filtra a poeira, semelhante aos filtros de ar condicionado, estes filtros devem ser periodicamente trocados pelo usuário.

O ar do átrio envidraçado é levado aos diferentes ambientes da edificação por meio de uma tubulação de canos de PVC de 100mm, sendo essa tubulação revestida com espuma sintética, isolante térmico, para diminuir as perdas de energia térmica até chegar aos cômodos da residência.

Os canos de PVC foram escolhidos por:

- a) facilidade de encontrá-los no mercado;
- b) existência de diversos tipos de conexões;
- c) praticidade de manuseio;
- d) baixa condutividade térmica;
- e) material de baixo custo.

A velocidade do ar que passa pelo sistema é determinada pelo uso de um exaustor centrífugo. Para os cálculos foi escolhido um exaustor, como os encontrados em coifas de cozinha. Foi utilizado o Exaustor da marca Tron1/4 HP Bivolt, Figura 3.13, com características listadas na Tabela 3.6.



Figura 3.13 – Exaustor Tron.

Fonte: Tron, 2011.

Tabela 3.6 – 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:
Peso aproximado	40,5cm
Modelo	7,5kg 2654

O funcionamento do subsistema de calefação será controlado por automação, sendo considerados dois modos de atuação para o sistema, o modo inverno, quando o subsistema de calefação está ligado e o modo verão quando o sistema é utilizado na forma de exaustor.

Para o funcionamento da automação, foi definido o uso de dois termostatos operando em conjunto. Um deles é colocado na saída da tubulação do ar quente do átrio para medir a temperatura do ar aquecido no coletor, e o outro se localiza dentro da sala de estar, ambiente considerado de circulação contínua de pessoas, dentro da edificação.

Durante todo o período frio, o calor obtido diretamente pela radiação solar e também o calor que está sendo irradiado nos fechamentos do sistema é direcionado para os ambientes da edificação. Quando o sistema de automação acusar que a temperatura dentro dos cômodos é 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, tornando inviável o repasse desse ar para os cômodos.

Quando a temperatura interna da edificação chegar a 26,5° C, temperatura estabelecida como máxima pela norma ABNT NBR 16401, o sistema de calefação será bloqueado, impedindo que a temperatura de conforto seja ultrapassada.

Nos meses de verão, é aberto um alçapão, de acordo com a Figura 3.14, que

faz a ligação de todo o sistema com uma chaminé. Nesse período de calor o ar aquecido dentro das edificações tende a subir por diferença de pressão e formar um colchão de ar quente na parte superior dos cômodos, que fica estanque devido ao formato convencional das edificações que não leva as aberturas até o teto. 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 ar será eliminado. Pela mesma chaminé, é eliminado também o ar que vem de todo o telhado, devido à diferença de densidade do ar, quando ele é aquecido, criando uma corrente que tende a subir sendo expulsa da edificação.

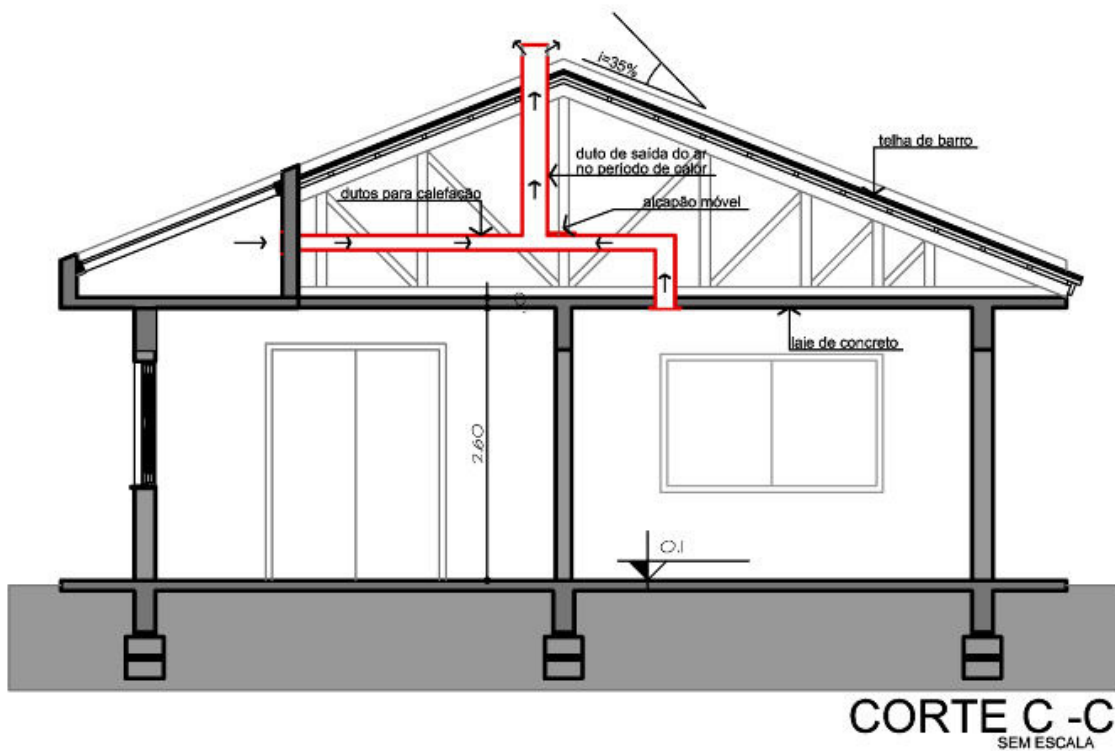


Figura 3.14 – Corte C-C evidenciando a chaminé para a retirada do ar quente da edificação nos períodos de calor.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a realização da modelagem matemática foi necessário a realização de considerações e simplificações, viabilizando assim o equacionamento e possibilitando a simulação computacional.

Nos tópicos subsequentes será apresentada a modelagem matemática do subsistema de calefação e do subsistema de aquecimento de água.

4.1 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, conforme apresentado item 2.6 do capítulo 2. A Figura 4.1 representa os fluxos de calor assumidos entre o coletor solar e a casa.

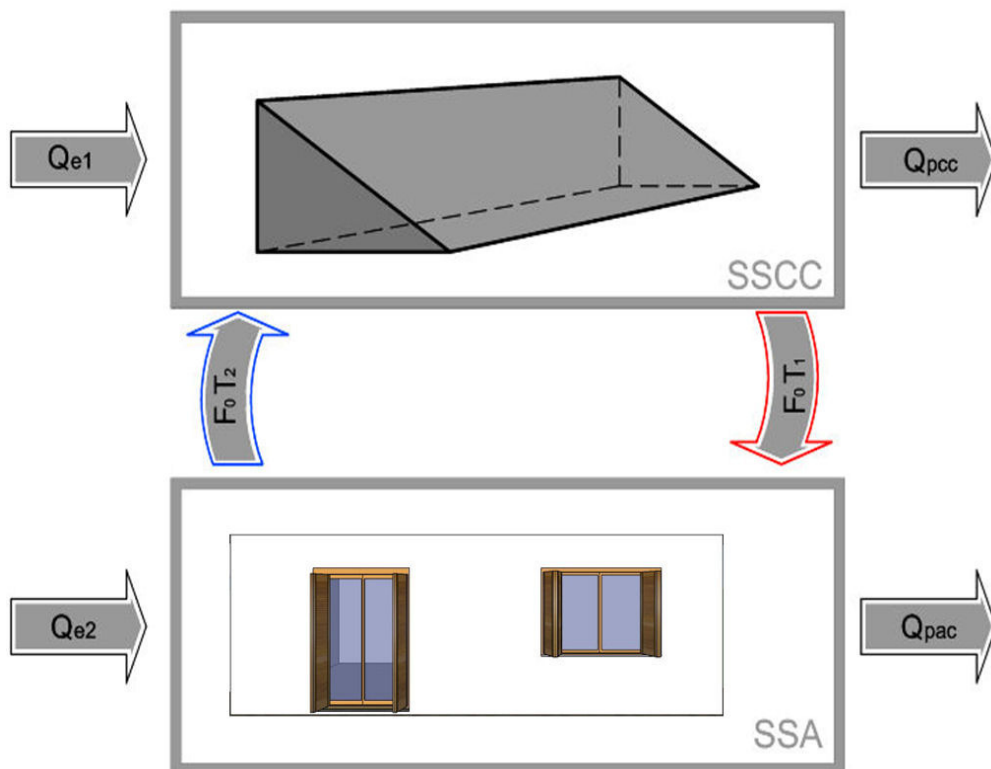


Figura 4.1 – Representação dos fluxos térmicos que envolvem o sistema de calefação e a casa.

A seguir apresenta-se o balanço de energia no subsistema de armazenamento do calor (SSA) e o balanço de energia no subsistema de coleta do calor para calefação (SSCC);

4.1.1 Balanço de energia no subsistema de armazenamento (SSA)

Para essa análise será adotado o volume de controle englobando o subsistema de armazenamento, como mostra a Figura 4.2.

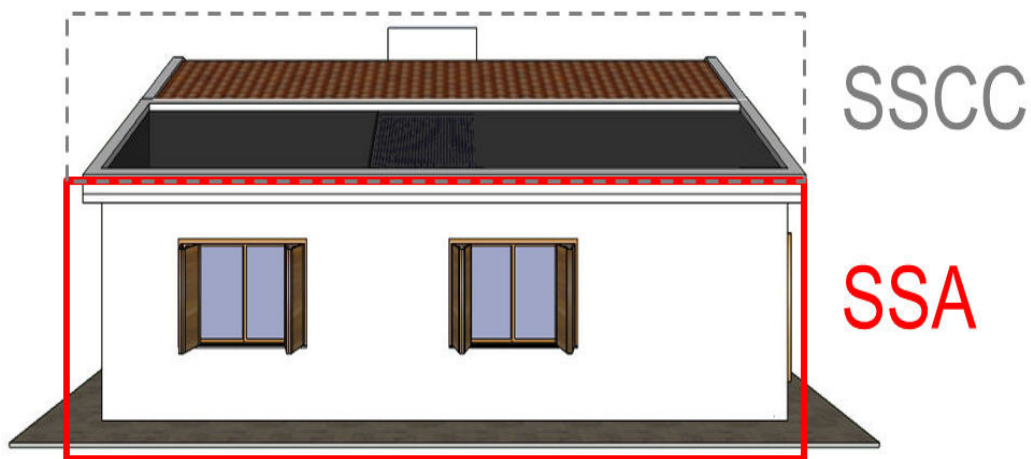


Figura 4.2 – Subsistema de calefação, evidenciando o subsistema de armazenamento – SSA.

Para iniciar a modelagem matemática do subsistema de armazenamento de calor como volume de controle será aplicado a equação de balanço de energia com o volume considerado conforme a Figura 4.3.

Na expressão (4.1) os valores com subscrito “0” indicam a entrada de energia pela inserção de fluido no sistema, e as que não possuem índice indicam a saída de energia pelo fluido. A Figura 3.17 mostra a representação esquemática das entradas e saídas de energia do reservatório térmico.

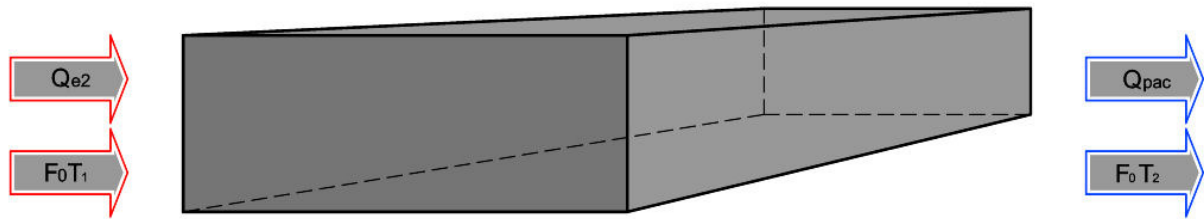


Figura 4.3 – Representação esquemática do balanço de energia no subsistema de armazenamento de calor - SSA

É necessário evidenciar algumas considerações, são elas:

- 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 armazenamento 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, ($K = 0, K_0 = 0$).
- A variação da energia potencial é desprezível (Pequena diferença de cotas entre entrada e saída), ($\phi = 0, \phi_0 = 0$).
- 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.
- 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, a equação 2.22 resulta em:

$$-F_0\rho_2U_2 + F_0\rho_1U_1 - Q_{p_{ac}} - F_0P_2 + F_0P_1 + Q_{e2} = \frac{d(UV_{ac}\rho)}{dt} \quad (4.1)$$

Onde:

- F_0 - Fluxo de ar que circula do SSA para o SSCC e do SSCC para SSA, [m^3/s];
- ρ_1 - Densidade do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [kg/m^3];
- U_1 - Energia Interna ar que entra no SSA proveniente do SSCC, (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- ρ_2 - Densidade do ar que sai do SSA para o SSCC, [kg/m^3];
- U_2 - Energia Interna do ar que sai do SSA para o SSCC (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- $Q_{p_{ac}}$ - Perdas de calor no SSA, [W];
- Q_{e2} - Energia térmica que entra no SSA proveniente da irradiação solar, [W];
- U - Energia Interna final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- V_{ac} - Volume de ar do SSA, [m^3].
- P_1 - Pressão do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [N/m^2];
- P_2 - Pressão do ar que sai do SSA para o SSCC, [N/m^2];

A densidade do ar varia pouco com a alteração da temperatura. Considerando a densidade constante, chega-se a:

$$-F_0\rho U_2 + F_0\rho U_1 - Q_{p_{ac}} - F_0P_2 + F_0P_1 + Q_{e2} = \frac{\rho d(UV_{ac})}{dt} \quad (4.2)$$

Substituindo $\left(\frac{1}{\rho}\right)$ por volume específico (\bar{v}) na equação (3.2) chega-se a:

$$F_0\rho((U_1 + P_1\bar{v}_1) - (U_2 + P_2\bar{v}_2)) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} = \rho \frac{d(UV_{ac})}{dt} \quad (4.2)$$

Segundo Incropera e Dewitt (2002), a entalpia (h), quando não há mudança de fase, é definida por:

$$h = U + P \cdot \bar{v} \quad (4.3)$$

Onde:

- h - Entalpia, [J/Kg];
- U - Energia Interna final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- P - Pressão do sistema, [N/m²];
- \bar{v} - Volume específico do ar no sistema, [m³/kg].

Substituindo (4.2) em (4.3) obtém-se:

$$F_0 \rho (h_1 - h_2) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} = \rho \frac{d(UV_{ac})}{dt} \quad (4.4)$$

Onde:

- F_0 - Fluxo de ar que circula do SSA para o SSCC e do SSCC para SSA, [m³/s];
- ρ - Densidade do ar no sistema, [kg/m³];
- h_2 - Entalpia do ar que sai do SSA para o SSCC, [J/Kg];
- h_1 - Entalpia do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [J/Kg];
- $Q_{p_{ac}}$ - Perdas de calor no SSA, [W];
- Q_{e2} - Energia térmica que entra no SSA proveniente da irradiação solar, [W];
- U - Energia Interna final (energia por unidade de massa), [J/Kg];
- V_{ac} - Volume de ar do SSA, [m³].

Segundo Luyben (1996), para líquidos, o termo $P\bar{v}$ da equação (4.4) é insignificante comparado a energia interna (U), logo essa equação expressa em função da entalpia se torna:

$$\rho \frac{d}{dt} (hV_{ac}) = F_0 \rho (h_1 - h_2) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} \quad (4.5)$$

A entalpia é função da composição, temperatura e pressão, mas principalmente da temperatura. Assumindo que o líquido não muda de fase, a

entalpia pode ser expressa como o produto da temperatura e capacidade térmica (LUYBEN, 1996). A partir dessa consideração, chega-se:

$$h = C_p(T - T_{ref}) \quad (4.6)$$

Onde:

- h - Entalpia, [J/Kg];
- C_p - Calor específico à pressão constante da água do sistema, [J/kg. °C];
- T - Temperatura de trabalho, [K];
- T_{ref} - Temperatura de referência, [K].

Considerando a temperatura de referência igual a zero ($T_{ref} = 0$) e substituindo (4.5) em (4.6) obtém-se:

$$\rho \frac{d(C_p T V_{ac} \rho)}{dt} = F_0 \rho (C_{p_1} T_1 - C_{p_2} T_2) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} \quad (4.7)$$

Onde:

- V_{ac} - Volume de ar do SSA, [m^3];
- F_0 - Fluxo do ar que circula do SSA para o SSCC, [m^3/s];
- C_p - Calor específico à pressão constante do sistema, [J/kg. °C];
- C_{p_1} - Calor específico à pressão constante do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [J/kg. °C];
- C_{p_2} - Calor específico à pressão constante do ar que sai do SSA para o SSCC, [J/kg. °C];
- T_1 - Temperatura do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [K].
- T_2 - Temperatura do ar que sai do SSA para o SSCC, [K].
- $Q_{p_{ac}}$ - Perdas de calor no SSA, [W];
- Q_{e2} - Energia térmica que entra no SSA proveniente da irradiação solar, [W];
- ρ - Densidade do ar no sistema, [kg/m^3];

Assim como a densidade do ar o calor específico varia muito pouco com a

alteração da temperatura. Realizando essa consideração, a equação (4.7) se torna:

$$\rho C_p \frac{d(TV_{ac})}{dt} = F_0 \rho C_p (T_1 - T_2) + F_1 \rho C_p (T_2 - T_1) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} \quad (4.8)$$

O termo $\left(\frac{dV_{ac}}{dt}\right)$ da expressão (4.8) significa que o volume do sistema se altera, porém no sistema em questão não há variação de volume do ar dentro do subsistema de armazenagem. Essa consideração aplicada na equação (3.21) resulta em:

$$V_{ac} \rho C_p \frac{d(T_2)}{dt} = F_0 \rho C_p (T_1 - T_2) + F_1 \rho C_p (T_2 - T_1) - Q_{p_{ac}} + Q_{e2} \quad (4.9)$$

Onde:

- V_{ac} - Volume de ar do SSA, [m^3];
- F_0 - Fluxo do ar que circula do SSA para o SSCC, [m^3/s];
- C_p - Calor específico à pressão constante do ar sistema, [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- T_1 - Temperatura do ar que entra no SSA proveniente do SSCC, [K].
- T_2 - Temperatura do ar que sai do SSA para o SSCC, [K].
- $Q_{p_{ac}}$ - Perdas de calor no SSA, [W];
- Q_{e2} - Energia térmica que entra no SSA proveniente da irradiação solar, [W];
- ρ - Densidade do ar no sistema, [kg/m^3].

A expressão (4.9) representa o balanço de energia que ocorre no SSA. No SSA há uma saída de fluxo de ar para o SSCC. Portanto é necessário aplicar o balanço de energia no SSCC, para obter mais uma equação, que juntamente com a expressão (4.9) solucione o modelo.

4.1.2 Balanço de energia no subsistema de coleta de irradiação para calefação (SSCC)

O volume de controle adotado para realizar a análise energética do coletor solar pode ser identificado na Figura 4.4.

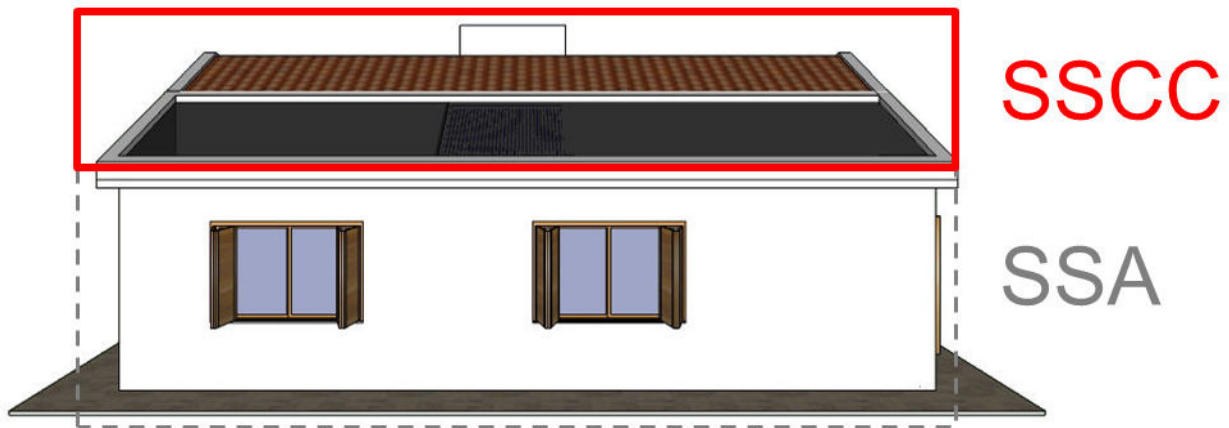


Figura 4.4 – Subsistema de calefação, evidenciando o coletor solar - SSCC.

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 4.5 demonstra esquematicamente as entradas e saídas de massa e energia no volume do coletor.

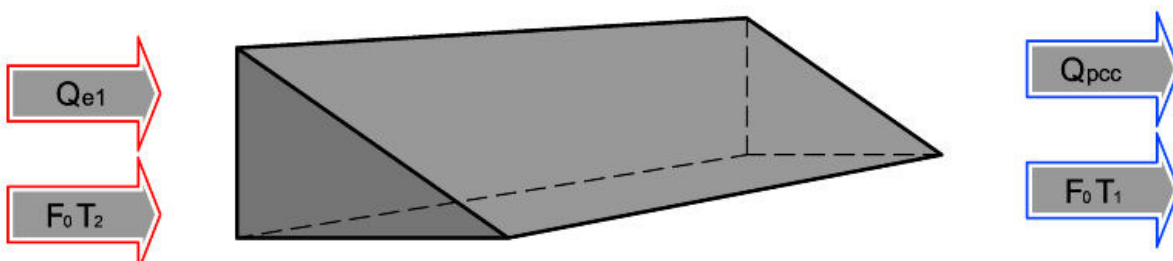


Figura 4.5 – Representação esquemática do balanço de energia no coletor SSCC.

As considerações iniciais são:

- No sistema de coleta de energia está chegando e saindo fluxo de ar a

uma vazão denominada F_0 , 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 SSCC não realiza trabalho ($W = 0$).
- O sistema de coleta de calor recebe calor via incidência solar denominado nesta modelagem Q_{e1} .
- Ocorrem perdas de calor pela superfície do vidro, denominadas nesta modelagem Q_{pcc} .
- A variação da energia cinética é desprezível, (As velocidades desenvolvidas são baixas) ($K = 0, K_0 = 0$).
- A variação da energia potencial é desprezível (Pequena diferença de cotas entre entrada e saída), ($\phi = 0, \phi_0 = 0$).
- Não ocorre reação química, logo não há geração de energia ($Q_g = 0$).
- O efeito da sujeira e poeira sobre o vidro será desprezado, devido a ausência de referências que descrevem matematicamente este fenômeno.
- Todo fluido que se encontra no interior das placas está à mesma temperatura.

Realizando os mesmos passos e considerações descritos no item 4.1.1 obtém-se a expressão (4.10) que representa o balanço de energia no sistema de coleta de calor para calefação.

$$V_{cc}\rho C_p \frac{d(T_1)}{dt} = F_0\rho C_p(T_2 - T_1) + Q_{e1} - Q_{pcc} \quad (4.10)$$

Onde:

- V_{cc} - Volume de ar do SSCC, [m^3];
- F_0 - Fluxo do ar que circula do SSCC para o SSA, [m^3/s];
- C_p - Calor específico à pressão constante do ar no sistema, [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- T_2 - Temperatura do ar que entra no SSCC proveniente do SSA, [k].
- T_1 - Temperatura do ar que sai do SSCC para o SSA, [k].
- Q_{pcc} - Perdas de calor no SSCC, [W];

- Q_{e1} - Energia térmica que entra no SSCC proveniente da irradiação solar, [W];
- ρ - Densidade do ar no sistema, [kg/m³].

4.2 Modelagem do sistema de aquecimento de água

A modelagem que será realizada 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 desprezadas as perdas e ganhos térmicos nas tubulações. Essa simplificação é justificável por este volume ser irrisório 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 4.6 representa os fluxos de calor assumidos na representação no subsistema de aquecimento de água.

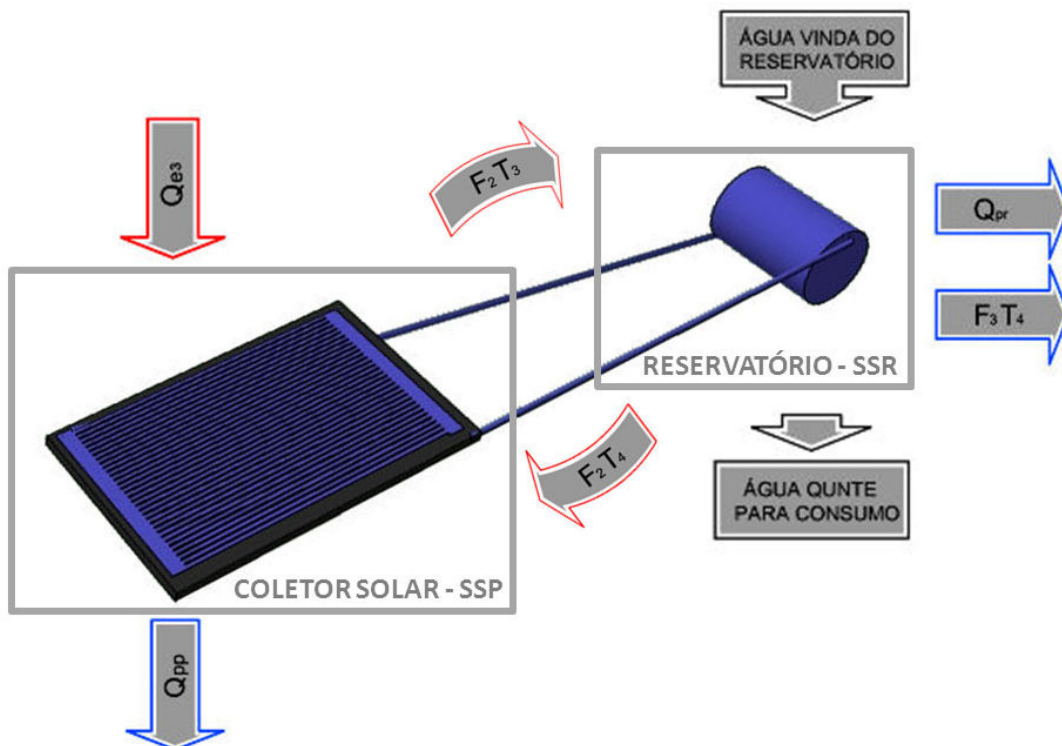


Figura 4.6 – Representação dos fluxos de calor no subsistema de aquecimento de água.

A seguir apresenta-se o balanço de energia no reservatório de água quente (SSR) e o balanço de energia nas placas coletoras de aquecimento solar de água (SSP);

4.2.1 Balanço de energia no reservatório de água quente (SSR)

O volume de controle adotado para realizar a análise energética do reservatório térmico é demonstrado na Figura 4.7.

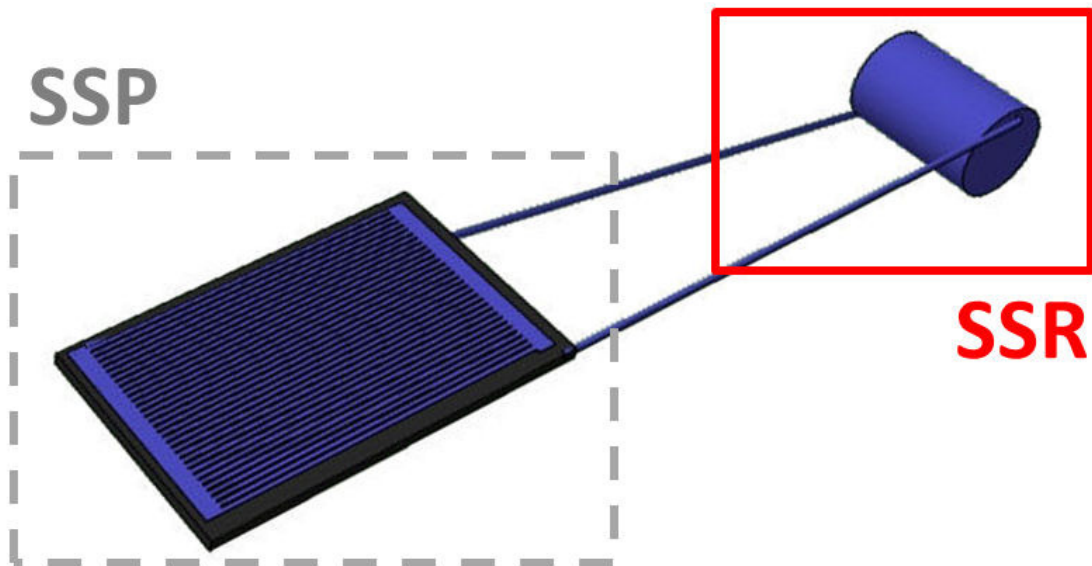


Figura 4.7 – Subsistema de aquecimento de água, evidenciando o reservatório térmico – SSR.

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 4.8 mostra esquematicamente as entradas e saídas de massa e energia que envolve o reservatório térmico.

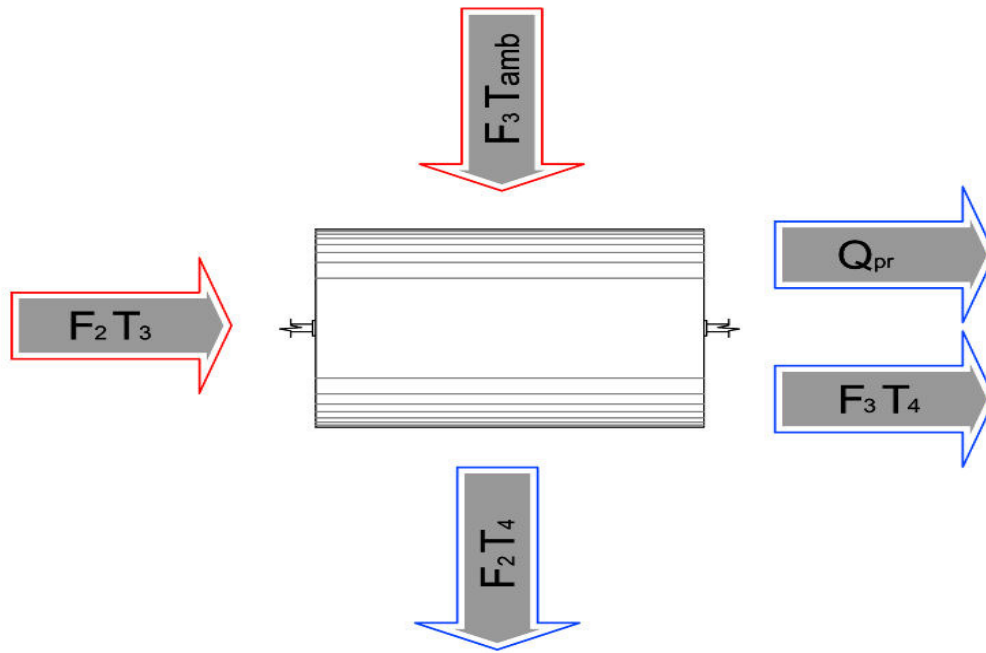


Figura 4.8 – Representação esquemática do balanço de energia no reservatório térmico – SSR.

As considerações iniciais são:

- O reservatório térmico não realiza trabalho ($W = 0$).
- O reservatório térmico não recebe irradiação solar direta.
- Ocorrem perdas de calor, denominadas nesta modelagem Q_{pr} .
- A variação da energia cinética é desprezível, (As velocidades desenvolvidas são baixas) ($K = 0, K_0 = 0$).
- A variação da energia potencial é desprezível (Pequena diferença de cotas entre entrada e saída), ($\phi = 0, \phi_0 = 0$).
- 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 descritos no item 4.1.1 obtém-se:

$$V_r \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} \frac{d(T_4)}{dt} = F_2 \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} (T_3 - T_4) + F_3 \rho_{h2o} C_{p_{h2o}} (T_{amb} - T_4) - Q_{pr} \quad (4.11)$$

A expressão (4.11) representa o balanço de energia no reservatório térmico de água.

Onde:

- V_r - Volume de água do SSR, [m^3];
- F_2 - Fluxo de água que circula entre o SSR e o SSP, [m^3/s];
- F_3 - Fluxo de água que sai do SSR para o uso (demanda), [m^3/s];
- $C_{p_{h_2o}}$ - Calor específico à pressão constante da água no sistema, [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- T_4 - Temperatura da água que sai do SSR, [$^\circ C$];
- T_{amb} - Temperatura da água que entra no SSR para repor a demanda (temperatura ambiente), [$^\circ C$];
- T_3 - Temperatura da água que entra no SSR após passar pelo SSP, [$^\circ C$];
- Q_{p_r} - Perdas de calor no SSR, [W];
- ρ_{h_2o} - Densidade da água no sistema, [kg/m^3].

4.2.2 Balanço de energia nas placas coletoras de calor para o sistema de aquecimento de água

O volume de controle adotado para realizar este balanço energético está definido na figura 4.9.

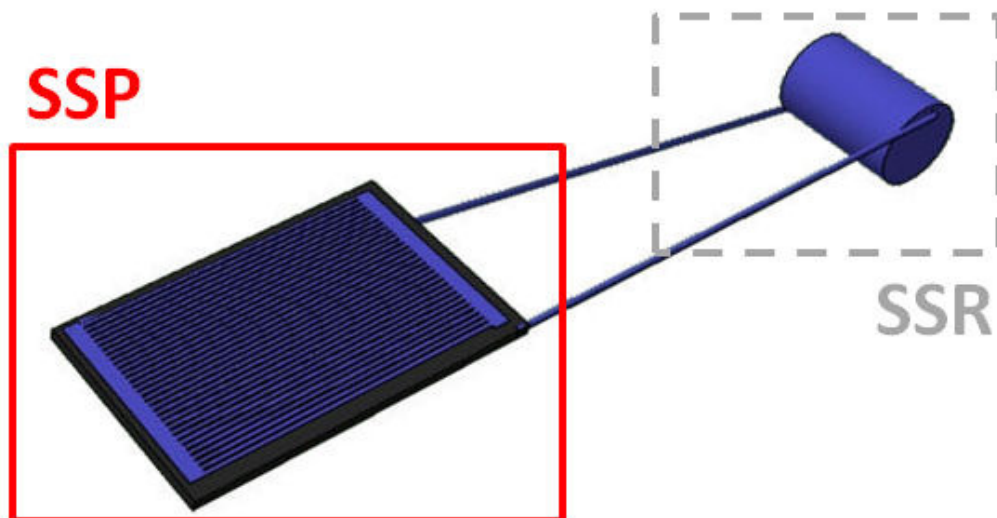


Figura 4.9 – Subsistema de aquecimento de água, evidenciando o painel coletor solar - SSP.

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 4.10, 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.

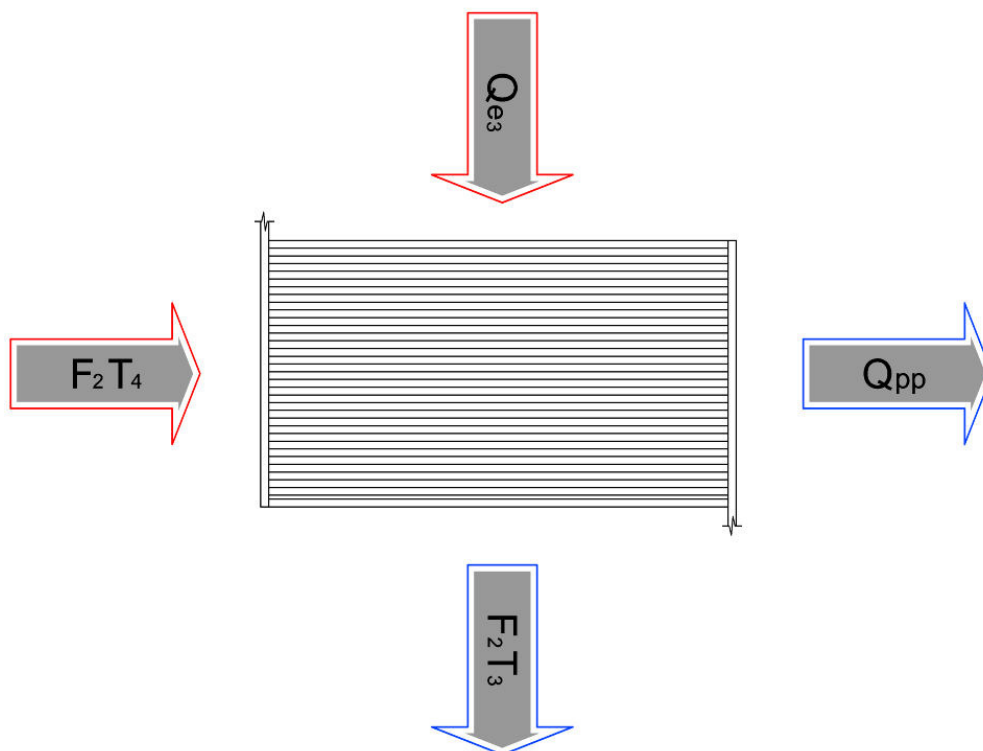


Figura 4.10 Representação esquemática do balanço de energia no painel coletor solar - SSP.

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_{e3} .
- Ocorrem perdas de calor, denominadas nesta modelagem Q_{pp} .
- A variação da energia cinética é desprezível, pois as velocidades desenvolvidas são baixas, ($K = 0, K_0 = 0$).
- A variação da energia potencial é desprezível, devido a pequena

diferença de cotas entre entrada e saída, ($\phi = 0, \phi_0 = 0$).

- Não ocorre reação química, logo não há geração de energia ($Q_g = 0$).
- Todo fluido que se encontra no interior 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 superior.
- A água circula a uma vazão F_2 definida pela bomba.

Realizando os mesmo passos e considerações descritos no item 4.1.1 obtém-se:

$$V_{pp}\rho_{h_2o}C_{p_{h_2o}}\frac{d(T_3)}{dt} = F_2\rho_{h_2o}C_{p_{h_2o}}(T_4 - T_3) + Q_{e3} - Q_{pr} \quad (4.12)$$

A expressão (4.12) representa o balanço de energia nas placas coletoras de calor para o sistema de aquecimento de água.

Onde:

- V_{pp} - Volume de água do SSP, [m^3];
- F_2 - Fluxo do água que circula entre o SSR e o SSP, [m^3/s];
- $C_{p_{h_2o}}$ - Calor específico à pressão constante da água no sistema, [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- T_4 - Temperatura da água entra no SSP proveniente do SSR, [$^\circ C$];
- T_3 - Temperatura da água que sai do SSP, [$^\circ C$];
- Q_{pp} - Perdas de calor no SSP, [W];
- Q_{e3} - Energia absorvida pelo SSP, [W];
- ρ_{h_2o} - Densidade da água no sistema, [kg/m^3].

4.3 Definição dos parâmetros de entrada

Para a realização das simulações é necessário a definição dos parâmetros fixos, variáveis e das equações de entrada, possibilitando assim que o programa realize as interações necessárias.

4.3.1 Parâmetros Térmicos

Nesta seção serão definidos os seguintes parâmetros térmicos:

- Densidade e calor específico da água.
- Densidade, calor específico, viscosidade, número de Prandtl e condutividade térmica do ar.
- Coeficientes de transferência de calor por convecção.

4.3.1.1 Densidade (ρ_{H2O}) e calor específico ($C_{p_{H2O}}$) da água

A Tabela 4.1 mostra os valores de densidade da água à pressão atmosférica (INCROPERA e DEWITT, 2002).

Tabela 4.1 – Densidade da água a pressão atmosférica

Temperatura [$^{\circ}C$]	$\rho_{\text{água}} [Kg/m^3]$
100	958,4
80	971,8
60	983,2
40	992,2
25	997,0
20	998,2
15	999,1
10	999,7

Fonte: INCROPERA (2002).

A densidade varia com a temperatura da água no processo. Os sistemas de aquecimentos solares convencionais operam normalmente com temperaturas entre 10,0 e 80,0 $^{\circ}C$. A variação da densidade nesse intervalo de temperaturas é baixa se

comparada à grandeza total da densidade (representa menos de 3% de variação). Para as simulações, considerou-se a densidade da água constante, representada pela média aritmética entre os valores da densidade da água a 10,0 e 80,0 °C.

Logo:

$$\rho_{H2O} = \frac{\rho_{H2O10^{\circ}C} + \rho_{H2O80^{\circ}C}}{2} = \frac{999,7 + 971,8}{2} = 985,75 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.13)$$

Onde:

- ρ_{H2O} - Densidade da água, [kg/m³];
- $\rho_{H2O10^{\circ}C}$ - Densidade da água a 10 °C, [kg/m³];
- $\rho_{H2O80^{\circ}C}$ - Densidade da água a 80 °C, [kg/m³].

Para os valores do calor específico da água em temperaturas que variam entre 10,0 e 80,0 °C pode-se considerar o valor de 4.184 [J/Kg.K], já que a variação em torno deste valor é pequena (INCROPERA, 2002).

4.3.2 Densidade (ρ), calor específico (C_p), viscosidade (μ_{∞}), número de Prandtl (Pr) e condutividade térmica (k_{∞}) do ar para o sistema

A Tabela 4.2 mostra os valores da viscosidade do ar para diferentes temperaturas (INCROPERA, 2002).

Tabela 4.2 – Viscosidade do ar a pressão atmosférica

Temperatura [°C]	μ_{ar} [N.s/m ²]
75	$2,1 \cdot 10^{-5}$
50	$1,9 \cdot 10^{-5}$
25	$1,8 \cdot 10^{-5}$
0	$1,7 \cdot 10^{-5}$

Fonte: INCROPERA (2002).

Com base na Tabela 4.2 percebe-se que a viscosidade do ar não sofre grandes alterações com a variação da temperatura. Por este motivo foram utilizados, para calcular o valor da viscosidade média do ar, dois extremos, uma temperatura do ar baixa (0 °C) e outra alta (50 °C). Realizando-se uma média aritmética desses chega-se a uma viscosidade média:

$$\mu_{\infty} = 1,8.10^{-5} \text{ [N.s/m}^2\text{]} \quad (4.14)$$

A Tabela 4.3 aponta os valores da densidade do ar para diferentes temperaturas (INCROPERA, 2002).

Tabela 4.3 – Densidade do ar a pressão atmosférica

Temperatura [°C]	ρ_{ar} [Kg/m ³]
75	1,0
50	1,1
25	1,2
0	1,3

Fonte: INCROPERA (2002).

Repetindo o procedimento realizado anteriormente para calcular a viscosidade média do ar, chega-se à densidade do ar média:

$$\rho = 1,2 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \quad (4.15)$$

A Tabela 4.4 mostra a variação da condutividade térmica e do número de Prandlt com a alteração da temperatura.

Tabela 4.4 – Condutividade térmica e número de Prandtl do ar à pressão atmosférica

Temperatura [°C]	Número de Prandtl	k_{ar} [W/m.K]
75	0,700	$3,0 \cdot 10^{-2}$
50	0,704	$2,8 \cdot 10^{-2}$
25	0,707	$2,6 \cdot 10^{-2}$
0	0,713	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Fonte: INCROPERA (2002)

O número de Prandtl e a condutividade térmica do ar não sofrem alterações significativas com a variação da temperatura do ar, conforme mostra a Tabela 4.4. Será então realizada a média aritmética para dois extremos de temperaturas, de 50,0 °C e 0,0 °C, para obter o valor médio:

$$k_{\infty} = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ [W/m.K]} \quad (4.16)$$

$$Pr = 0,708 \text{ [W/m.K]} \quad (4.17)$$

Com relação ao calor específico do ar, INCROPERA (2002) fornece o valor de 1.006,5 [J/Kg.K], considerando a temperatura prevista de trabalho (entre 0,0 °C e 50,0 °C).

4.3.3 Coeficientes de transferência de calor por convecção (h)

A condutância superficial externa depende da velocidade do escoamento e do comprimento da superfície pela qual o vento escoará, retirando calor da superfície. Com isso, é necessário o cálculo de 5 coeficientes de transferência de calor por convecção. São eles:

h_1 - correspondente à perda de calor por convecção que ocorre no vidro do

- sistema de calefação, que possui comprimento 9,7 metros;
- correspondente à perda de calor por convecção que ocorre nas paredes que possuem comprimento de 8 metros;
- correspondente à perda de calor por convecção que ocorre nas duas paredes que possuem comprimento de 10,7 metros;
- correspondente à perda de calor por convecção que ocorre na superfície do vidro que transmite calor para o sistema de aquecimento de água;
- correspondente à perda de calor por convecção que ocorre internamente na residência. INCROPERA (2002) sugere para este caso de ambiente confinado adotar para o coeficientes de transferência de calor por convecção valores de 1 a 2 . Para esta modelagem foi adotado o valor de 1,5 .

A correlação que define os coeficientes de transferência de calor por convecção depende da largura das placas, do coeficiente de transferência de calor por condução (k), do número de Reynolds médio (Re) e do número de Prandtl médio (Pr).

O número de Reynolds médio, por sua vez, é dado por:

$$\text{-----} \quad (4.18)$$

Onde:

- número de Reynolds médio, [adimensional];
- - Densidade média do ar à temperatura ambiente, [kg/m^3];
- - Velocidade média do ar, para Santa Maria no mês desejado (julho) foi registrado o valor de 2,2 [m/s] (SWERA, 2011);
- - Comprimento da placa, [m];
- - Viscosidade média à temperatura ambiente do ar, [$N.s$].

Substituindo o número de Reynolds (3.32) na equação que descreve o número de Nusselt (2.10), chega-se à seguinte expressão:

$$h = \left(\frac{\rho_{\infty} \cdot u_{\infty} \cdot L_p}{\mu_{\infty}} \right)^{1/2} \cdot \frac{0,664 \cdot Pr^{1/3}}{L_p} \quad [W/m^2 \cdot K] \quad (4.19)$$

Onde:

- h - Coeficiente de transferência de calor por convecção que atua sobre o SSC, $[W/m^2 \cdot K]$;
- ρ_{∞} - Densidade média do ar à temperatura ambiente, $[kg/m^3]$;
- u_{∞} - Velocidade média do ar, $[m^3/s]$;
- Pr - Número de Prandtl médio do ar à temperatura ambiente, $[Adimensional]$;
- L_p - Comprimento da placa coletora, $[m]$;
- μ_{∞} - Viscosidade média do ar, $[N \cdot s/m^2]$.

Substituindo os valores referentes temos os diversos valores de h_1, h_2, h_3, h_4 e h_5 como:

$$h_1 = 1,89 [W/m^2 \cdot K]$$

$$h_2 = 2,08 [W/m^2 \cdot K]$$

$$h_3 = 1,80 [W/m^2 \cdot K] \quad (4.20)$$

$$h_4 = 5,89 [W/m^2 \cdot K]$$

$$h_5 = 1,50 [W/m^2 \cdot K]$$

4.3.4 Equações de troca térmica

A seguir apresentam-se as equações de troca térmica, que definem a energia térmica que entra no sistema e as perdas de calor envolvidas.

4.3.4.1 Calor que entra no sistema (Q_e)

O calor entra no sistema através da irradiação solar. A irradiação atinge a superfície das placas coletoras e paredes. Nesta modelagem, será considerada entrada de calor no sistema em três situações:

- Calor que entra no sistema por meio do SSCC definido como (Q_{e1}).
- Calor que entra no sistema por meio do SSA definido como (Q_{e2}).
- Calor que entra no sistema por meio do SSP definido como (Q_{e3}).

A definição destes parâmetros de entrada será mostrada nos tópicos subsequentes.

- Calor que entra no sistema por meio do SSCC (Q_{e1});

Da irradiação que atinge a placa de vidro 8mm do SSCC 84% (Fator Solar) é admitido (SANTOS, 2002), essa porcentagem é a soma das parcelas de transmissão direta pelo vidro, e da parcela da energia absorvida que é reirradiada para o ambiente interno. O calor que aquece a placa é dado pela irradiação absorvida multiplicada pela área coletora, ou seja:

$$G_{abs} = G_{inc} \cdot \alpha_1 \quad [W/m^2] \quad (4.21)$$

$$Q_{e1} = G_{abs} \cdot A_{sscc} \quad [W] \quad (4.22)$$

Onde:

- G_{abs} – Irradiação solar absorvida, [W/m^2];
- G_{inc} - Irradiação solar incidente, [W/m^2];
- Q_{e1} - Energia térmica que entra no sistema via SSCC, [W];
- α_1 - Absortividade do vidro, [Adimensional];
- A_{sscc} – Área da placa do SSCC, [m^2].

A placa coletora do SSCC possui uma área de 19,4 m² e o fator solar do vidro é considerado como 0,85. Porém a placa que se situa no teto da casa não recebe calor integralmente em todo o período diurno, foi estabelecido para esta simulação que a placa receberá irradiação direta das 08:00 às 16:00 horas.

Para quantificar a radiação incidente foram utilizados os dados reais para a cidade de Santa Maria - RS fornecidos pelo projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) e pelo software Radiasol do Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

- Calor que entra no sistema por meio do SSA (Q_{e2});

As paredes da edificação recebem radiação solar, contribuindo para o aquecimento da mesma.

O calor que é absorvido pelo SSA é definido pelas seguintes equações:

$$G_{abs} = G_{inc} \cdot \alpha_2 \quad [W/m^2] \quad (4.23)$$

$$Q_{e2} = G_{abs} \cdot A_{ssa} \quad [W] \quad (4.24)$$

Onde:

- G_{abs} – Irradiação solar absorvida, [W/m^2];
- G_{inc} - Irradiação solar incidente, [W/m^2];
- Q_{e2} - Energia térmica que entra no sistema via SSA, [W];
- α_2 - Absortividade da tinta acrílica branca que cobre a superfície externa da edificação, [Adimensional];
- A_{ssa} - Área da superfície do SSA exposta à irradiância solar, [m²].

Na modelagem, ao se projetar a orientação da edificação com a parte frontal na direção norte, considera-se que as paredes leste e oeste receberão incidência solar. Assumiu-se que a parede leste recebe irradiação solar das 06:00 às 11:00 horas e a parede oeste das 13:00 às 18:00 horas.

Segundo INCROPERA (2002), uma parede revestida com tinta acrílica branca absorve 26,0% da irradiação incidente, logo $\alpha_2 = 0,26$. As paredes leste e oeste da edificação possuem área de 21,5 m².

- Calor que entra no sistema por meio do SSP (Q_{e3});

Da radiação solar que incide no vidro de 8 mm superior, apenas 67% é admitida pelo SSP, resultante da multiplicação do valor da transmitância de 8mm (0,77) pelo fator solar do vidro 3mm do painel de aquecimento de água (0,87), resultando no valor final da energia que chega até o sistema de aquecimento de água (SANTOS, 2002).

O calor que aquece a placa é dado pela irradiância solar absorvida multiplicada pela área coletora, ou seja:

$$G_{abs} = G_{inc} \cdot \alpha_3 \quad [W/m^2] \quad (4.25)$$

$$Q_{e3} = G_{abs} \cdot A_{ssp} \quad [W] \quad (4.26)$$

Onde:

- G_{abs} – Irradiação solar absorvida, [W/m^2];
- G_{inc} - Irradiação solar incidente, [W/m^2];
- Q_{e3} - Energia térmica que entra no sistema via SSP, [W];
- α_3 - Absortividade do vidro, [Adimensional];
- A_{ssp} - área da placa do SSP [m^2].

A placa coletora do SSP possui uma área de 2,0 m^2 e admite 0,68 da radiação que atinge o vidro superior do sistema de captação. Porém a placa que se situa no teto da edificação não recebe calor integralmente em todo o período diurno, analogamente à irradiação absorvida para calefação, estabeleceu-se para esta simulação que a placa receberá irradiação direta das 08:00 às 16:00 horas.

4.3.4.2 Perdas de calor do sistema (Q_p)

Para quantificar o calor perdido do sistema. Definiu-se que a perda de calor ocorre das seguintes maneiras:

- perdas de calor que ocorrem no subsistema de coleta de calor para calefação (SSCC) (Q_{pcc});

- perdas de calor que ocorrem no subsistema de armazenamento (residência) (SSA) (Q_{pac});
- perdas de calor que ocorrem no subsistema de calor para o aquecimento de água (SSP) (Q_{pp});
- perdas de calor que ocorrem no subsistema de armazenamento de água aquecida (SSR)(Q_{pr}).
-

Nos tópicos subsequentes serão definidas estas perdas de calor.

- perda de calor no coleta de calor para calefação (SSCC) (Q_{pcc})

No subsistema de captação (SSCC), a camada superficial de vidro diminui que o calor seja perdido por emissão de radiação (efeito estufa), porém parte do calor é perdida pela convecção que ocorre na superfície da placa coletora. Para essa análise serão consideradas as seguintes condições:

- todo o ar contido no interior da placa está à mesma temperatura (mistura perfeita);
- o calor é perdido para o meio apenas por convecção;
- a temperatura que se encontra o ar no interior da placa é igual à temperatura de saída do mesmo (T_1); e
- as temperaturas do vidro, da superfície absorvedora e do ar contido no interior do circuito são as mesmas.

A partir das considerações acima descritas, a perda de calor da placa coletora é descrita pela equação:

$$Q_{pcc} = [(h_1 A_{cc} (T_1 - T_{amb}))] [W] \quad (4.27)$$

Onde:

- Q_{pcc} - Perdas de calor nas placas do SSCC, [W].
- h_1 - Coeficiente de transferência de calor por convecção que atua sobre o SSCC, [$W/m^2 \cdot K$].
- A_{pcc} - Área da placa do SSCC (19,4), [m^2];
- T_1 - Temperatura o ar no SSCC, [$^{\circ}C$];

- - Temperatura ambiente do ar, [°C];
- Perda de calor no subsistema de armazenamento (SSA)

No subsistema de armazenamento (edificação) ocorrem perdas de calor por condução, convecção e radiação pelas paredes. Estas podem ser modeladas pelo conceito de resistências térmicas.

A parede é composta por uma camada de argamassa de revestimento com 0,025m de espessura, uma camada de tijolo com espessura 0,15m e mais uma camada externa de argamassa de revestimento com 0,025m de espessura. Esta superfície pode ser definida na forma de resistências térmicas conforme a Figura 4.11.

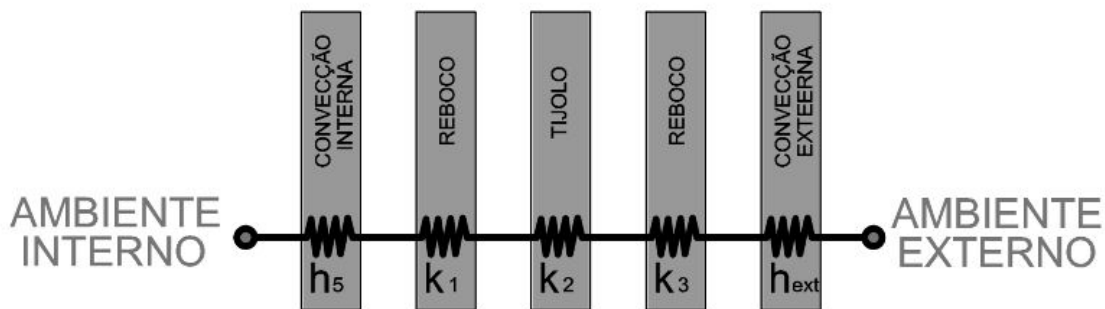


Figura 4.11 – Circuito de resistências térmicas da parede.

Onde,

- - Coeficiente de transferência de calor por convecção das superfícies internas = 1,5 [W/m².K] (espaço confinado);
- k_1 - Condutividade térmica do reboco = 1,15 [W/m.K] (INCROPERA, 2002);
- k_2 - Condutividade térmica do tijolo = 1,05 [W/m.K] (INCROPERA, 2002);
- k_3 - Condutividade térmica do reboco = 0,72 [W/m.K] (INCROPERA, 2002);
- - Coeficiente de transferência de calor por convecção das superfícies externas. Vale 1,8 [W/m².K] para as paredes leste/oeste e 2,08 [W/m².K] para as paredes norte/sul ;

Aplicando o equacionamento de resistências térmicas multiplicando por 2 a área referente à parede norte/sul (para englobar as duas superfícies) e multiplicando por 2 a área das paredes leste/oeste e somando as perdas, chega-se a perda total do SSA:

$$Q_{pac} = \frac{T_2 - T_{amb}}{0,0254} + \frac{T_2 - T_{amb}}{0,0335} \quad (4.28)$$

Onde;

- Q_{pac} - Perdas de calor nas placas no SSA, [W];
 - T_2 - Temperatura da água no SSA, [°C];
 - T_{amb} - Temperatura ambiente, [°C].
- Perda de calor no subsistema de coleta, painel de aquecimento de água (SSP) (Q_{pp})

Para essa análise será considerado:

- toda a água contida no interior da placa está à mesma temperatura (mistura perfeita);
- o calor é perdido para o meio apenas por convecção;
- a temperatura que se encontra a água no interior da placa é igual à temperatura de saída da mesma (T_3);
- as temperaturas do vidro, da superfície absorvedora e da água contida no interior do circuito são as mesmas.

A partir das considerações acima descritas, a perda de calor da placa coletora é descrita pela equação (3.41):

$$Q_{pp} = \left[\left(h_4 A_p (T_3 - T_{amb}) \right) \right] [W] \quad (4.29)$$

Onde:

- Q_{pp} - Perdas de calor nas placas do SSP, [W].
- h_4 - Coeficiente de transferência de calor por convecção que atua sobre o SSP, [$W/m^2 \cdot K$].

- A_p - Área da placa do SSP (2,0), [m^2];
 - T_3 - Temperatura o ar no SSP, [$^{\circ}C$];
 - T_{amb} - Temperatura ambiente do ar, [$^{\circ}C$];
- Perda de calor no reservatório térmico (Q_{pr}).

O reservatório é composto por 3 camadas de material como mostra a Figura 4.12.

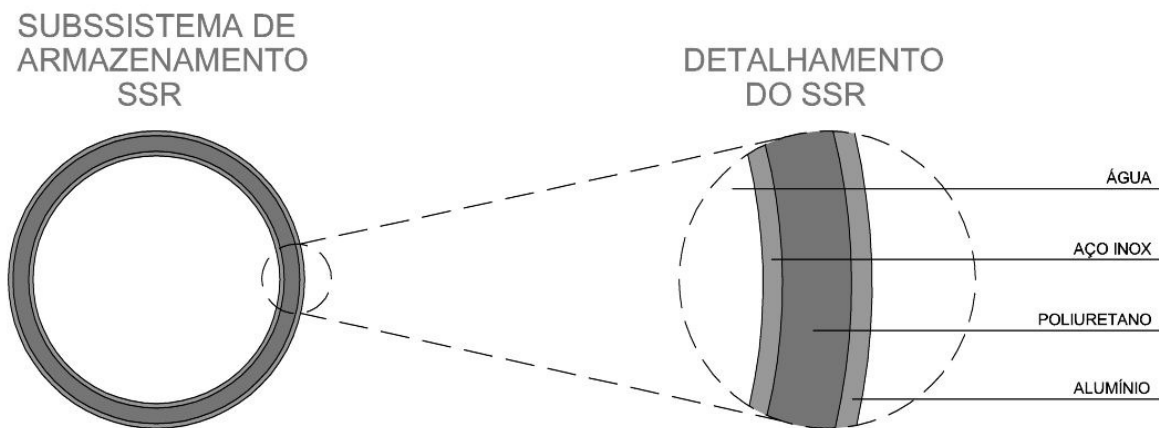


Figura 4.12 – Materiais que compõem o reservatório.

Segundo INCROPERA (2002), os coeficientes de transferência de calor por condução dos materiais que compõem o reservatório são os da Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficientes de transferência de calor por condução

Material	k [$W/m.K$]
Aço Inox	15,0
Poliuretano	0,026
Alumínio	237,0

Usando o conceito de resistências térmicas, pode-se associar reservatório térmico ao circuito térmico mostrado na Figura 4.13.

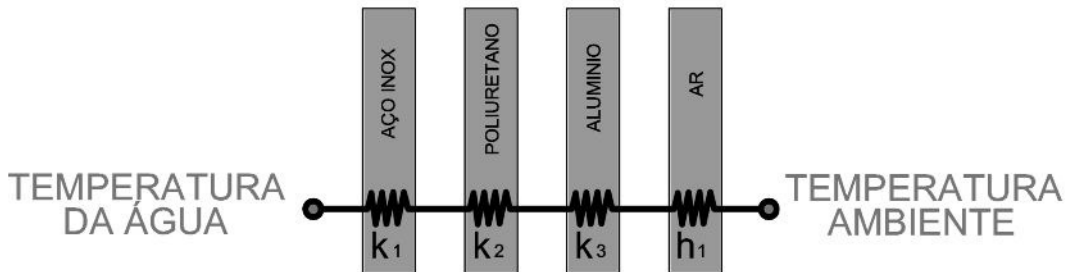


Figura 4.13 – Circuito de resistências térmicas para o reservatório.

Aplicando as equações (2.15) e (2.16) e associando as resistências em série chega-se a:

$$Q_{pr} = \frac{T_4 - T_{amb}}{\frac{L_{inox}}{k_{inox \cdot Ar}} + \frac{L_{poliuretano}}{k_{poliuretano \cdot Ar}} + \frac{L_{alumínio}}{k_{alumínio \cdot Ar}} + \frac{1}{h_r \cdot Ar}} \quad [W] \quad (4.30)$$

Onde:

- Q_{pr} – Perda de calor no reservatório, [W];
- T_4 - Temperatura da água no SSR, [°C];
- T_{amb} - Temperatura ambiente externa, [°C];
- L_{inox} - Espessura do inox, [m];
- $L_{poliuretano}$ - Espessura do poliuretano, [m];
- $L_{alumínio}$ - Espessura do alumínio, [m];
- k_{inox} - Coeficiente de transferência de calor por condução do inóx, [W/m.K];
- $k_{poliuretano}$ - Coeficiente de transferência de calor por condução do poliuretano, [W/m.K];
- $k_{alumínio}$ - Coeficiente de transferência de calor por condução do alumínio, [W/m. K];
- h_5 – Coeficiente de transferência de calor por convecção que atua sob o

reservatório, definido anteriormente como h_5 (ambiente confinado) $[W/m^2.K]$;

- A_r - Área externa do reservatório, $[m^2]$.

“ A_r ” representa a área de contato da superfície externa do reservatório com o ar. Ela pode ser calculada por:

$$A_r = \left(\frac{\pi.D_r^2}{4}\right).2 + \pi.D_r.L_r \quad [m^2] \quad (4.31)$$

$$A_r = 2,5 [m^2] \quad (4.32)$$

Onde:

- A_r - Área externa do reservatório, $[m^2]$;
- D_r - Diâmetro do reservatório térmico, $[m]$;
- L_r - Comprimento do reservatório térmico, $[m]$.

Substituindo a área de contato da superfície externa do reservatório com o ar, os coeficientes de transferência de calor por condução e convecção, e os comprimentos de cada camada de material que compõem o reservatório na expressão (3.38), chega-se a:

$$Q_{p_r} = \frac{T_4 - T_{amb}}{1,74} \quad [W] \quad (4.33)$$

Onde:

- Q_{p_r} - Perdas de calor no SSR, $[W]$;
- T_4 - Temperatura da água no SSR, $[^\circ C]$;
- T_{amb} - Temperatura ambiente, $[^\circ C]$.

4.3.5 Dimensões físicas

Nesta seção serão definidos os parâmetros de entrada referentes às dimensões físicas do sistema.

4.3.5.1 Volume de ar no subsistema de coleta de calor para calefação (V_{cc})

Com a inclinação de 35° do telhado, largura de 2 metros e comprimento de 9,7 metros, o volume total é igual a $6,01 \text{ m}^3$. Conforme mostra a Figura 4.14.

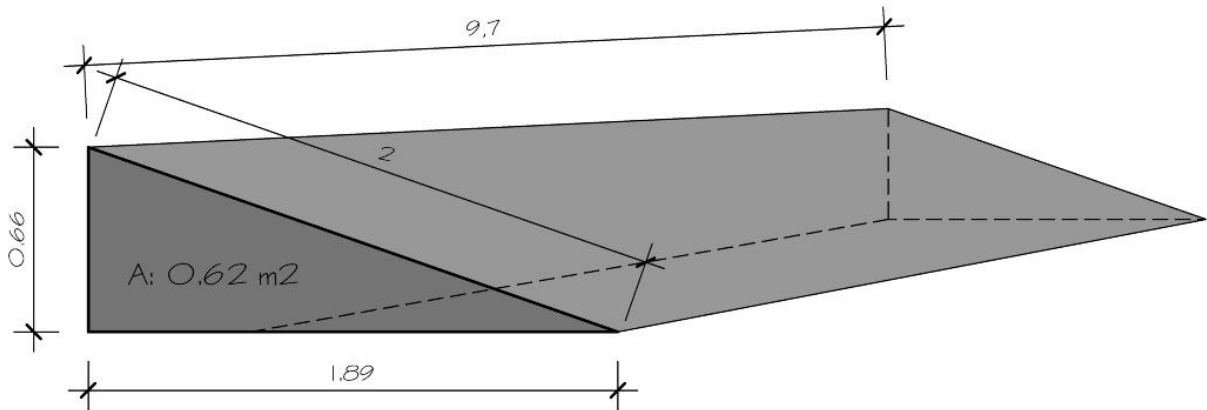


Figura 4.14 – Coletor solar para calefação SSCC.

4.3.5.2 Volume de ar contido no subsistema armazenamento (edificação) (V_a)

Volume total de ar contido na edificação é igual a $222,56 \text{ [m}^3\text{]}$.

4.3.5.3 Volume de água contida no subsistema coleta de calor para aquecimento de água (V_p)

Volume total da água contida no interior da tubulação da placa coletora usada no aquecimento da água. Vale $0,0069 \text{ [m}^3\text{]}$.

4.3.5.4 Volume de água contido no interior do reservatório térmico (V_r)

Definido anteriormente na descrição física o volume no interior do reservatório é fixo e possui o valor de $0,2 \text{ m}^3$.

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

As simulações foram realizadas com o programa computacional Simulink®, que é um pacote de dados do programa Matlab®, especializada na simulação a partir de diagrama de blocos.

5.1 O programa desenvolvido

A simulação dinâmica do sistema de aquecimento de água e calefação residencial deve realizar o cálculo das variáveis de temperatura T_1 , T_2 , T_3 e T_4 baseado nas equações (3.22), (3.25), (3.26) e (3.27) a cada instante de tempo. O tempo total de simulação foi de 24 horas (86.400 segundos).

Para resolver as equações, o Simulink® possui, em sua biblioteca, blocos que possuem funções pré-programadas, esses blocos são organizados em rotinas, de forma que possam executar as funções necessárias ao cálculo visado.

Escrevendo as equações (3.22), (3.25), (3.26) e (3.27) no formato de diagramas de blocos, com o auxílio da biblioteca de blocos do Simulink®, chega-se às rotinas de simulação. Foram gerados dois programas, um referente ao sistema de calefação (mostrado na Figura 5.1) e outro correspondente ao sistema de aquecimento de água (Figura 5.2).

O objetivo do programa de simulação do sistema de calefação é estimar o ganho de temperatura ocasionado pelo sistema. Para tanto foi analisada principalmente a variável T_2 em dois testes: com e sem sistema de calefação. Para o sistema de aquecimento de água, monitorou-se a variável T_4 para descobrir qual o ganho de temperatura da água.

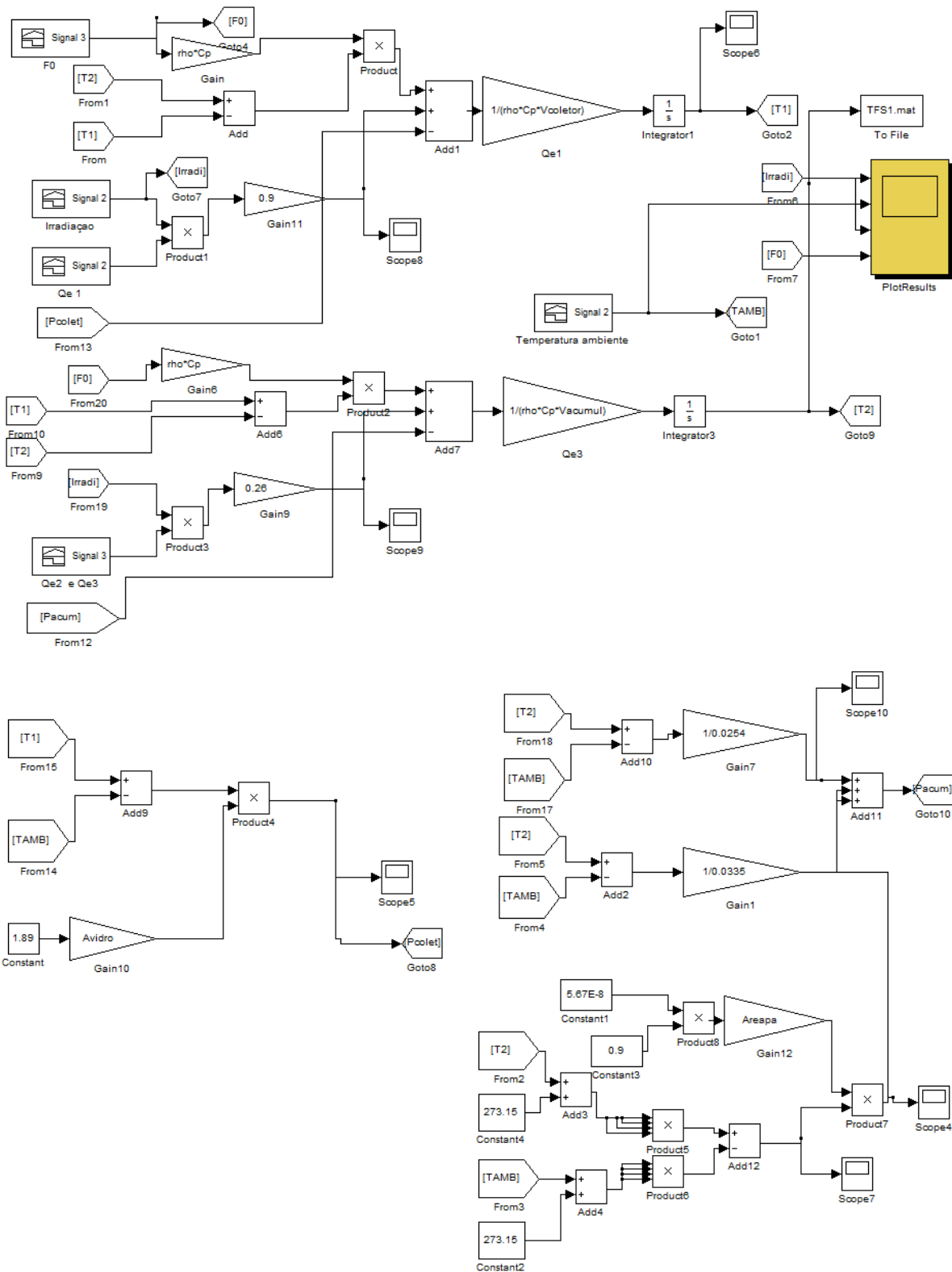


Figura 5.1 – Rotina desenvolvido para simulação do sistema de calefação

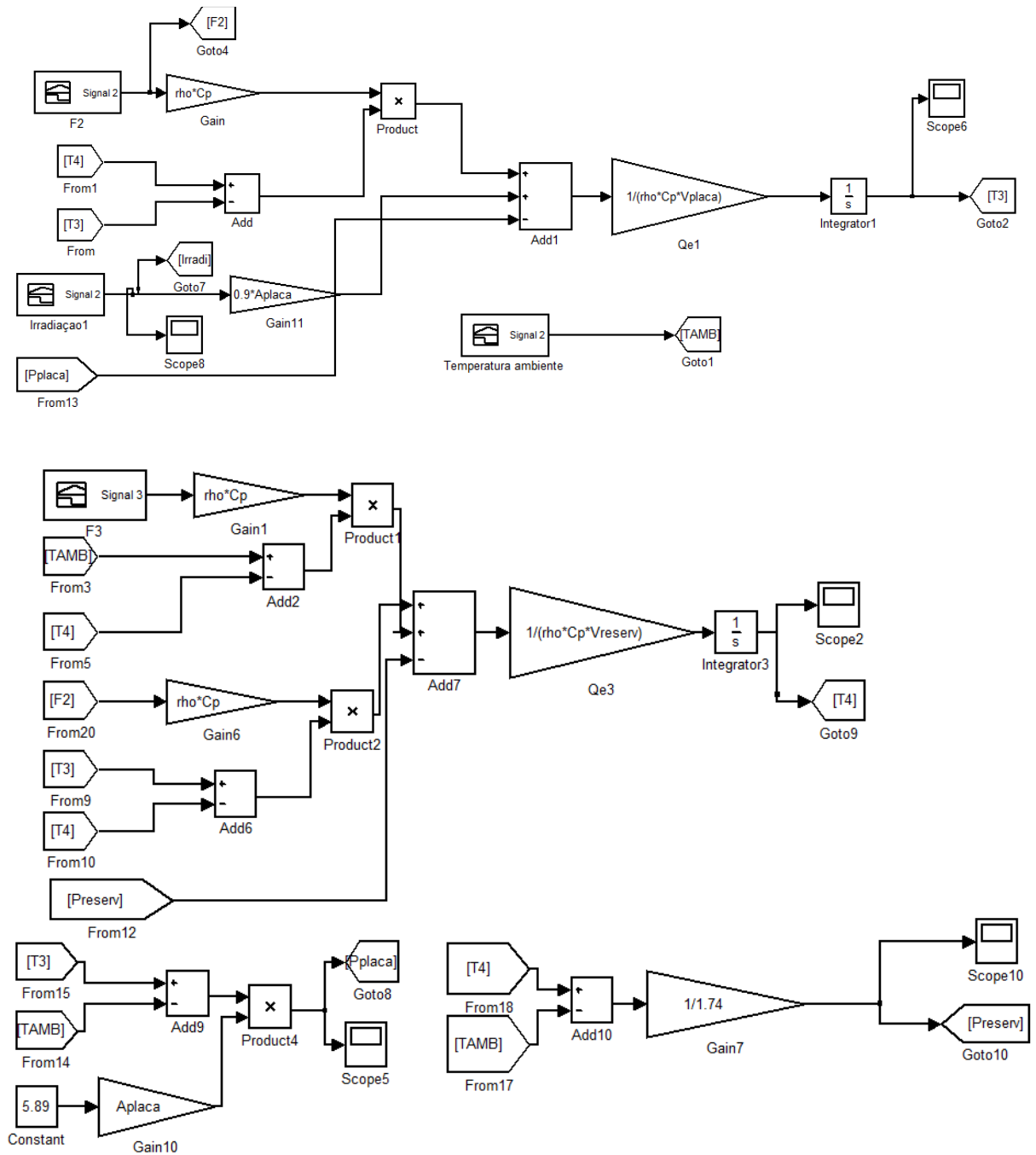


Figura 5.2 – Rotina desenvolvido para simulação do sistema de aquecimento de água.

5.2 Parâmetros de simulação

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).

O projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), juntamente com o INPE e LABSOLAR/UFSC, fornece dados climáticos de 20 cidades brasileiras, inclusive Santa Maria - RS. Estes dados são disponibilizados através de arquivos climáticos TMY (Typical Meteorological Year), e foram utilizados nessa pesquisa (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. Com isso, é possível estimar se houve ganho de temperatura considerável, viabilizando ou não o empreendimento.

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.

6 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Esse capítulo apresenta a avaliação do desempenho térmico do sistema combinado proposto através da análise de dados obtidos pela simulação computacional, os quais são apresentados na forma de gráficos que relacionam irradiação solar e as temperaturas externa e interna sem e com o uso da calefação e a temperatura da água de consumo. O mesmo é dividido em duas partes, para o melhor entendimento do projeto na íntegra, as quais são:

- Resultados referentes ao subsistema de calefação de ambientes;
- Resultados referentes ao subsistema de aquecimento de água para o consumo.

6.1 Resultados referentes ao subsistema de calefação de ambientes

O gráfico da Figura 6.1 apresenta a relação entre a irradiância solar ao longo de um dia típico, a temperatura externa e duas curvas representando a temperatura interna da edificação considerando sem o uso e com o uso da calefação.

Pode-se verificar ainda, na mesma figura, o potencial positivo de desempenho do sistema de calefação. 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 subsistema de calefação em funcionamento. Com a calefação ligada, a temperatura interna do protótipo atinge um pico de 27 °C, enquanto a temperatura máxima sem a utilização do sistema é de 20 °C, aumentando em aproximadamente 7 °C a temperatura do ambiente em questão.

Pouco tempo após o término da irradiação solar o exaustor é considerado desligado, encerrando o processo de insuflamento, o que acarreta a aproximação das três curvas de temperatura, de forma a cumprir o comportamento já esperado para essa situação.

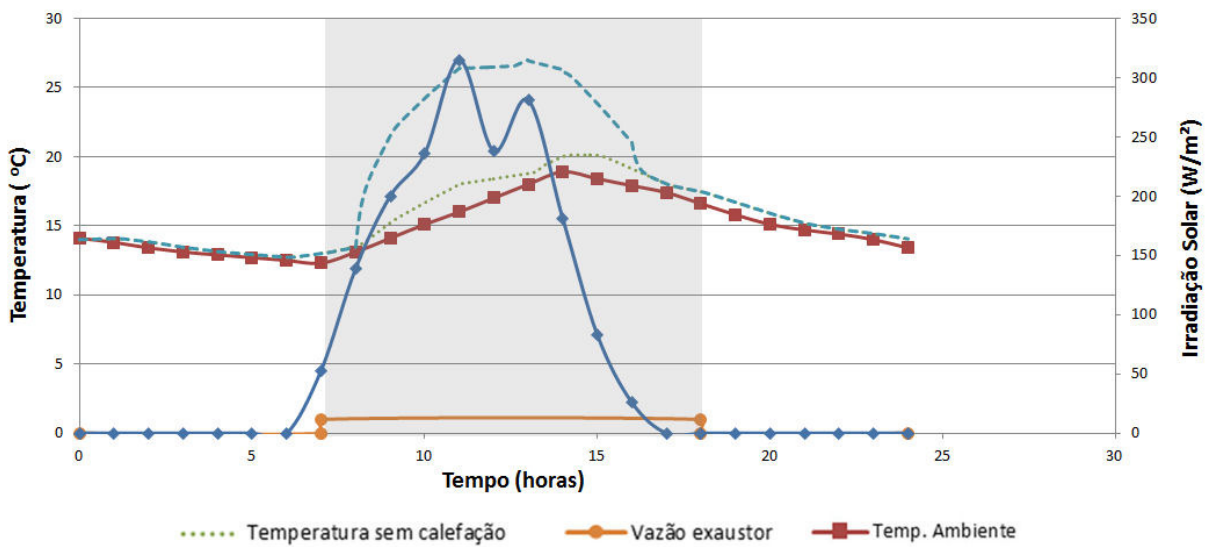


Figura 6.1 – Variação ao longo do dia da irradiação solar e das temperaturas externa e interna sem e com o uso da calefação

Na figura 6.2 as temperaturas internas obtidas pela simulação computacional são comparadas com as temperaturas de conforto estabelecidas pela NBR 116401 (ABNT, 2008) que considera termicamente confortáveis as temperaturas entre 20 °C e 22 °C para o período de inverno. A área em cinza mostra a faixa de conforto estabelecida pela norma, a temperatura interna com uso da calefação transpassa esses limites durante aproximadamente 30% do tempo, deixando a temperatura interna em conforto. Já a temperatura interna sem a calefação permanece durante todo o período em valores que estão abaixo da faixa de conforto estabelecida.

No entanto para o pior período do dia, o sistema mostra-se ineficiente. No entanto, podemos considerar que mesmo que não esteja sendo insuflado calor na edificação ela permanecerá com temperaturas mais altas neste período como efeito da inércia térmica dos fechamentos.

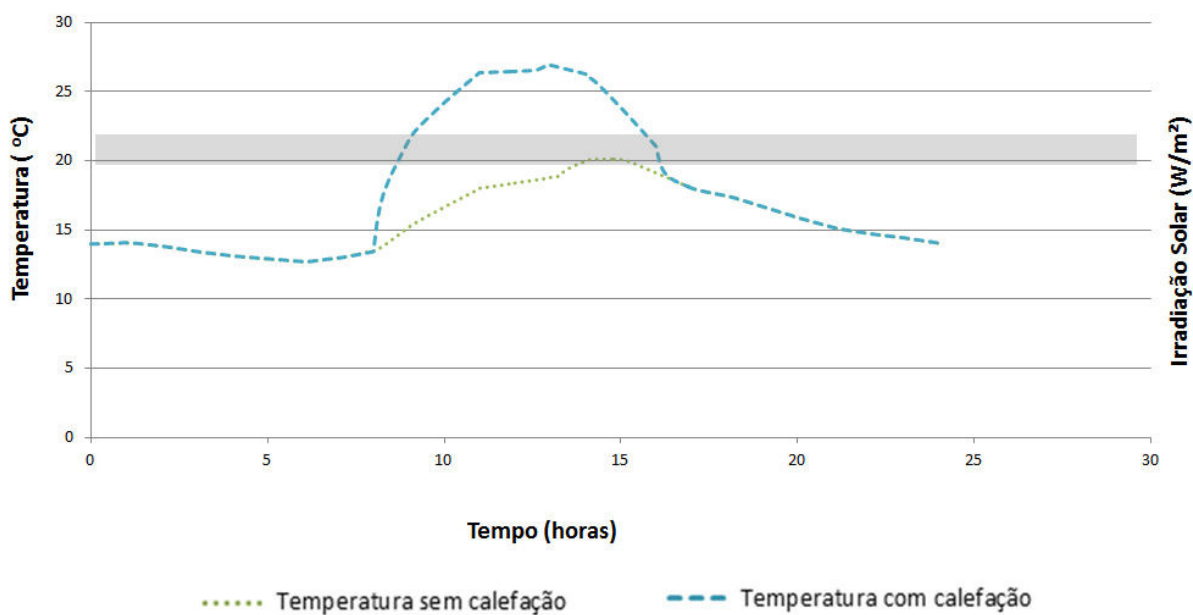


Figura 6.2 – Relação entre as temperaturas interna sem e com o uso da calefação e os limites de conforto estabelecidos pela NBR 16401 (ABNT,2008).

6.2 Resultados referentes ao subsistema de aquecimento de água

A Figura 6.3 apresenta os gráficos de aquecimento de água separados de acordo com as estações do ano. Em meses como dezembro, janeiro, fevereiro e março a temperatura da água ultrapassa os 35 °C, podemos considerar, para esses meses, que a demanda de água quente seja suprida sem o uso de energia elétrica.

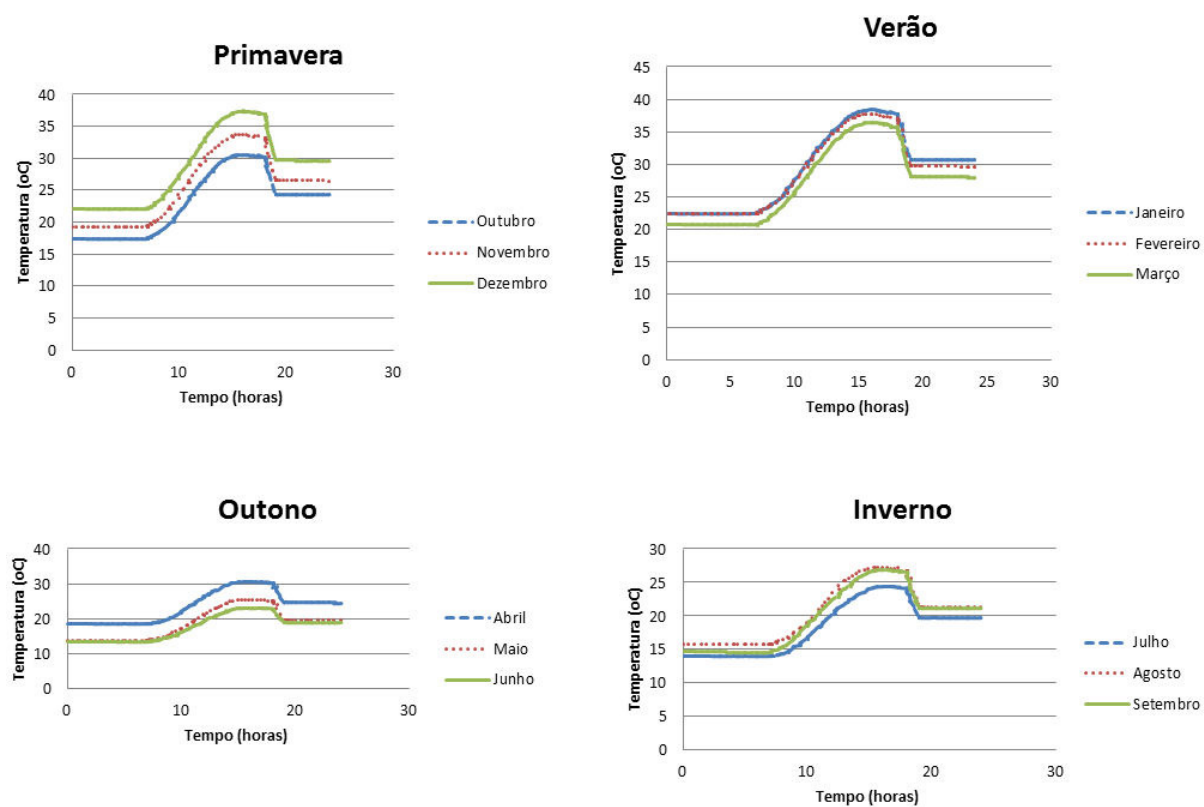


Figura 6.3 – Gráficos com as temperaturas resultantes para água quente divididos em estações do ano.

O gráfico da Figura 6.4 apresenta o resultado da simulação para o mês de julho, com os valores de temperatura da água para 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.

Considerando a radiação solar bastante limitada desse mês, pode-se avaliar os resultados positivos 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.

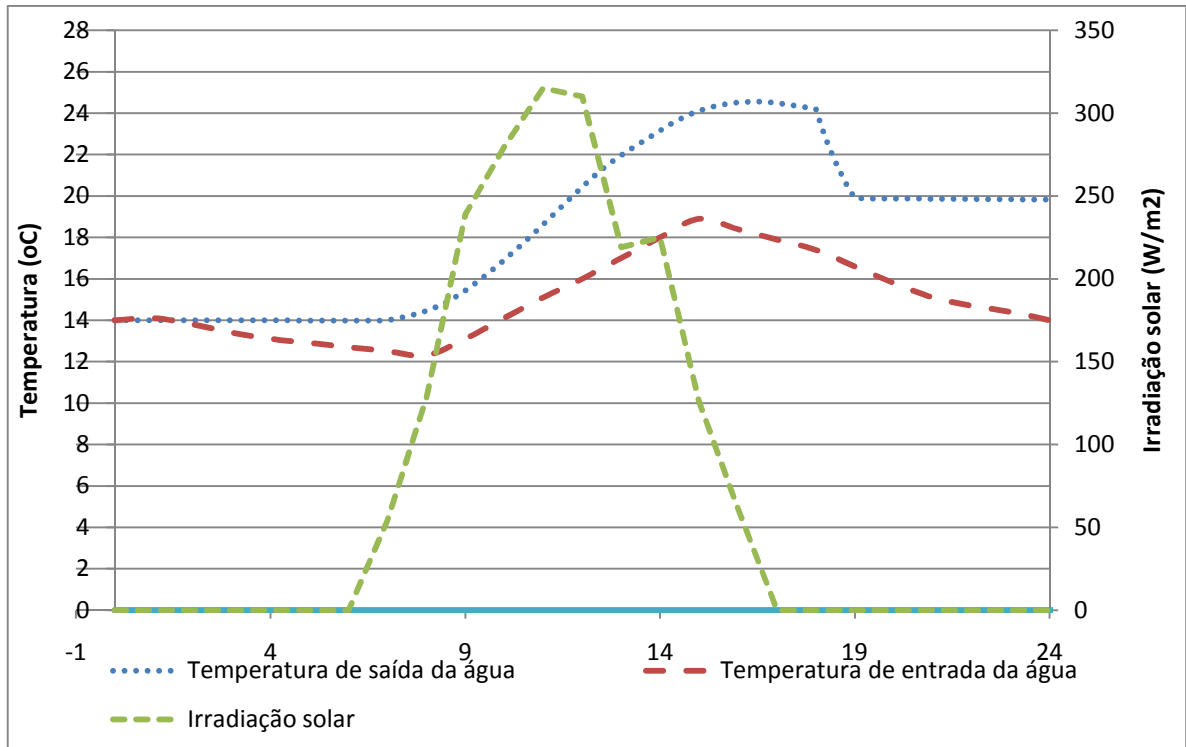


Figura 6.4 – Relação entre Irradiação solar e a temperatura da água de consumo sem e com o uso do aquecimento solar.

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 a ducha receberá a água já em uma temperatura mais alta, haverá a redução da demanda de energia elétrica, para garantir que a temperatura adequada para banho seja atingida.

No Gráfico da Figura 6.4 é possível observar também a queda 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.

7 CONCLUSÕES

O grande crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil e no mundo se tornou motivo de preocupação e tem colocado em foco a necessidade do uso mais racional e eficiente da energia. Nossas habitações são apenas parte do nosso habitat, elas estão intimamente ligadas ao meio ambiente circundante, regional e global. É nossa responsabilidade adaptar nossas edificações para que possamos diminuir a poluição do meio ambiente. Assim, todos os esforços no sentido da criação de artefatos e estudos visando a criar residências mais sustentáveis são louváveis pela preocupação com o planeta no qual vivemos.

Conforme visto anteriormente, no Brasil existem sistemas de calefação e aquecimento de águas disponíveis no mercado, no entanto os formatos tradicionalmente encontrados, normalmente consomem muita energia elétrica, tornando-os caros e também prejudiciais ao meio ambiente devido ao elevado consumo energético. 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. Assim, proporcionando conforto nas edificações sem agredir o meio ambiente, visando à criação de edificações mais sustentáveis.

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 a 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.

Mesmo com a simulação 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. Com a utilização do sistema proposto a temperatura interna dos ambientes em questão tem um aumento bastante significativo, atingindo uma elevação próxima a 7 °C. Considerando que as temperaturas consideradas termicamente confortáveis pela NBR 16401 (ABNT, 2008) devem estar entre 20 °C e 22 °C, o uso do 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 uma ducha eletrônica, com regulador de potência, para elevar a temperatura da água a um nível aceitável para o banho, não será necessária a instalação de um aquecedor auxiliar diretamente 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.

Este projeto 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.

Para a montagem da modelagem matemática foram feitas diversas considerações e algumas simplificações foram inevitáveis, de modo a reduzir a complexidade do programa computacional, ou também pela ausência de referências bibliográficas específicas e pela necessidade de obtenção dos dados a partir de medições complexas no sistema real, fugindo então do escopo do trabalho.

Além da simulação computacional, seria importante construir um protótipo para testar na realidade a viabilidade do sistema combinado e comparar com os resultados simulados. Essa então seria uma alternativa para trabalhos a serem desenvolvido no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES, 2006. Atlas brasileiro de energia solar / Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Rüter. - São José dos Campos: INPE, 2006. il. 60p. ; 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 128:** Instalações prediais de água quente – 1963.

_____. **NBR 15569:** Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação, Rio de Janeiro, 2008b.

_____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 12269:** Instalação de sistemas de aquecimento de água em circuito direto – procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6401:** Instalações centrais de ar-condicionado para conforto – Parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro, 1980.

ABRAVA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO. **ABRAVA**. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br>>. Acesso em 10 out. 2010.

ALDABÓ, Ricardo. **Energia solar**. São Paulo: Artliber, 2002. 155p.

ASBC **Aquecimento Solar de Baixo Custo**. Disponível em: <<http://www.sociedadedosol.com.br>>. Acesso em: dez 2003.

ARRUDA, L. B. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BOGO, A. et al. **Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações Visando o Conforto Térmico**. Relatório Interno do Núcleo de Pesquisa em Construção da UFSC. Florianópolis: NPC-UFSC, 1994.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 outubro 2001. Seção 1, p. 1, v. 138, n. 200.

BRINKWORTH, B. J. **Energia solar para el hombre**. Madri: H. Blume, 1982. 242p.

CABIROL, T.; PELISSOU, A.; ROUX, D. **O aquecedor solar de água**. Lisboa: Cetop, 1980.

COSTA, E. C., **Arquitetura Ecológica: Condicionamento Térmico Natural**. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.

CRUZ, Eduardo Manuel González. Selección de materiales en la concepcion arquitectonica bioclimática. In: _____. **Estudios de Arquitectura Bioclimática**. Venezuela, 1999.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: Conforto Ambiental**, Revan, Rio de Janeiro, 2003.

CPFL. **Relatório interno: Aquecedor solar da mineração Jundu**. Campinas: abr 1989. 20 p.

CRUZ, Eduardo Manuel González. Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. In: **Estudios de Arquitectura Bioclimática**. Venezuela, 1999.

DECHECHI, E. C. **Apostila: Controle de processos**. Foz do Iguaçu: Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, 2010.

DORNELLES, K. A. **Estudo de casos de Inércia Térmica de Edificações na cidade de São Carlos**, SP. [dissertação de mestrado] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2004.

DIOFFO, A. M. Energia Solar e Desenvolvimento. In: **Seminário Alternativas de Desenvolvimento: Energia solar**, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Economia e Planejamento: São Paulo, SEP, 1976. (Série Documentos, 6).

ELETROBRAS – 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: ELETROBRAS/PROCEL, 2007.

FANTINELLI, J. T. **Tecnologia Solar de Interesse Social e Baixo Custo para Aquecimento de Água na Moradia**. (Dissertação de Mestrado). Campinas: FEM/UNICAMP, 2002. 180p.

FEARNSIDE, Philip M. **Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e conseqüências**. Megadiversidade, v.1, n.1, jul., p. 113-123, 2005.

FRAINDENRAICH, Naum. Tecnologia Solar no Brasil. Os próximos 20 anos. In: **Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos vinte anos**. Campinas, SP: UNICAMP, 2002.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel 2003. 243p.

FERRARO, N. G.; PENTEADO, P.C.; SOARES, P.T. ; TORRES, C. M. **Física ciência e tecnologia**. São Paulo: Moderna 2001. 665p.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1998.

GONZALÉZ CRUZ, E. M. Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. **Estudios de Arquitectura Bioclimática**, Anuário 2002, v. IV, p. 117-134, México, 2002.

GONORING T. B.; AZAMBUJA, V. M. **Estudo da resistência à corrosão do aço inoxidável utilizado no interior de caldeira**. Vitória, p. 126 – 127, 2009.

GOULART, S. V.; Thermal inertia and natural ventilation - Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in southern Brazil, A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Open University for the Degree of Doctor of Philosophy, October 2004.

HARRISON, E.F., e.f.; Minnis, p.; Barkstrom, B.R.; Gibson, G.G. **Radiation Budget at the Top of Atmosphere**, edited by R.J. Gurney, J.L. Foster, and C.L. Parkinson, Atlas of Satellite Observations Related to Global Change, Cambridge University Press, San Diego, 1993.

HINRICHS, R. A.; **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3ª ed. Norte-americana. / Roger A. Hinrichs, Merlin Kleinbach; [tradução técnica Flávio Maron Vichi, Leonardo Freire de Mello]. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Microrregiões geográficas**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: dez. 2009.

IEA- International Energy Agency – Relatórios 1998-2002.

INCROPERA, e F.P., DEWITT .P. **Fundamentos de Transferência e Calor e de Massa**. Cap. 2: Introdução à Condução. 3ª ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 1992.

INMET – Normais Climatológicas [online]: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: jan. 2010.

KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. Oxford: BL, 2009.

KASTRUP, L. F. C., **Tecnologia de Geração de Energia Limpa a Serviço da Promoção da Saúde**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública, São Paulo, 2006.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Paraninfo, Madrid, 1977.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R., **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 188 p.

LAMBERTS, Roberto; GHISI EneDir; PEREIRA, Claudia D. ; BATISTA, Juliana O. **Casa Eficiente: Consumo e Geração de Energia**, vol. 2, UFSC- LabEEE, Florianópolis- SC, 2010.

LAVIGNE, P.; FERNANDEZ, P.; BRÉJON, P.. Architecture Climatique: Une contribution au développement durable, Tome 1, Bases et approche physique. France. 1994.

LOURENÇO JÚNIOR, I. **Estudo de um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás – Solar**. 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

LUYBEN, W. L. **Process modeling, simulation and control for chemical engineers**. 2 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1996.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário - o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145 a 159, 2004.

McCLUNEY, W. R.[1993] The benefits of using window shades, **ASHAE Journal**, November/93.

McVeigh, J.C. Sun Power: An Introduction to the applications of solar energy. Pergamon Press, Oxford,1977.

MESQUITA, L. C. S. Panorama atual da utilização de aquecimento solar. In: **Fontes Não-convencional de Energia: As tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa**. 2ª ed, Florianópolis-SC: Ed da UFSC, 1999.

OLGYAY, **Design with climate**. Princeton University Press, Princeton, New Jersey USA, 1963.

OLIVA, G. A.; BORGES, T. P. F. Teste de Campo Piloto com Pré-Aquecedor Solar de Água para Chuveiros Elétricos de Potência Reduzida. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA – II SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA. **Anais...** Rio de Janeiro, 22 a 25 de outubro de 1996.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. – **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos : INPE, 2006. II

PEREIRA, E.B.; COLLE, S.; **Revista Ciência Hoje**, 22. 1997.

PEREIRA, E. M. D. et al. Energia Solar Térmica. In: **Fontes Renováveis de Energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003. p. 239-279.

PROCEL- PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2003.
<http://www.eletronbras.gov.br/procel/site/home/index.asp>

RIVERO, R. **Arquitetura e clima**. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, 1985.

ROAF, Susan; FUENTES, Manuel; THOMAS, Stephanie. **Ecohouse: a casa ambientalmente sustentável**. Tradução Alexandre Salvaterra. 3 ed., Porto Alegre: Bookman, 2009.

ROBINSON, N. The radiation reaching the earth. In: **Solar Radiation**. Amsterdam: Elsevier, 1966. p. 111-160.

SANTOS, J. C. P. **Metodologia para avaliação do desempenho térmico e visual de elementos transparentes frente à radiação solar**. 2002. 354 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade federal de São Carlos, São Carlos.

SAUER, I. L. **Um Novo Modelo para o Setor Elétrico Brasileiro**. São Paulo: Universidade de São Paulo/ USP/IEE, dez. de 2002.

SIQUEIRA, A. S. **Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

SOUZA, L. G. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar**. (Tese de Doutorado). Natal: UFRN, 2002. 154p.

SOUZA L. G. M.; Mendes J. U. L.; Santos R. D.; Lima H. J.; Melo A. V.; Randemberg N. Reservatório térmico alternativo para uso em sistemas solares de aquecimento de água. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, p. 9696 – 9706, 2006.

STIVARI, S. M. S. ; OLIVEIRA, A. P. de ; SOARES, J. . **On the Climate Impact of the Local Circulation in the Itaipu Lake Area.** Climatic Change, v. 72, p. 103-121, 2005.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil:** banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R.. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Belo Horizonte: Imprensa Universitária, 1991.

VAZ, Joaquim. **Estudo Experimental e número sobre o uso do Solo como Reservatório de Energia para o Aquecimento e Resfriamento de Ambientes Edificados.** Tese de doutorado, UFRGS, Porto Alegre-RS, 2011.

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.

WEISS, W. **Solar Heating Systems for Houses:** a design handbook for solar combisystems. Solar Heating and Cooling Executive Committee of the International Energy Agency (IEA). UK, 2003

WOELZ, A. T. **Aquecedor solar de baixo custo (asbc):** uma alternativa custo-efetiva. Encontro de energia no meio rural – AGRENER, 4, Campinas – SP 2002. Anais. Campinas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA 2002. 1 CD-ROM.

YANNAS, S. **Solar Energy and Housing Design.** v.1: Principles, Objectives, Guidelines. London, Architectural Association School of Architecture, sd.