

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE  
COLETORES SOLARES POLIMÉRICOS

CLÁUDIO SOAVE

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, Janeiro de 2014

PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE  
COLETORES SOLARES POLIMÉRICOS

CLÁUDIO SOAVE

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Batista Dias (PPGEM, Unisinos)  
Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti (PPGEM, Unisinos)  
Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini (UERGS)

São Leopoldo, Janeiro de 2014

## AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de agradecer aqueles que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Primeiramente, o professor Mario Henrique Macagnan, por ter me recebido de braços abertos, aceitando ser meu orientador e realizando assim um grande desejo meu. Agradeço ainda pelo tema proposto no qual envolveram teoria e prática. Agradeço aos professores pela amizade e por terem despertado em mim todo o interesse na energia solar.

Agradeço aos colegas de laboratório William e Wilson que me ajudaram a desenvolver o programa e a montar o equipamento.

Agradeço a minha noiva, Alessandra Moraes Jacques, por ter compreendido minha ausência durante os longos períodos de trabalho, principalmente por fazer parte dos meus dias, pois sem ela eu não teria conseguido. Por fim, agradeço a toda minha família, ao Fábio Frizzo e à Claudia Soave pelo carinho, apoio incondicional, incentivo e pela torcida da minha realização profissional e pessoal. Em especial, ao meu pai e a minha mãe, que mais uma vez, não mediram esforços para contribuir na minha formação profissional e tornaram tudo isso possível.

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo".

Albert Einstein

## INSTITUIÇÃO E FONTE FINANCIADORA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Fontes Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos e foi financiado pela FINEP, através da Chamada Pública Saneamento Ambiental e Habitação 07/2009, Rede 22 – Uso Racional de Água e Eficiência Energética em Habitações de Interesse Social, Convênio 0924/10 e pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, através da concessão de uma bolsa modalidade DTI-C.

## RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia limpa e renovável que vem destacando-se no cenário mundial, em especial em países desenvolvidos como Japão, Alemanha e EUA. Uma das aplicações em que o uso da energia solar vem crescendo, atualmente, é no aquecimento de água para uso doméstico e industrial. No cenário brasileiro, há um incentivo por parte do Governo Federal para trabalhos de pesquisa que visam desenvolver tecnologias de baixo custo para o aproveitamento da energia solar térmica por famílias de baixa renda, diminuindo o consumo de eletricidade.

Um sistema de aquecimento de água com energia solar é essencialmente composto por coletor e reservatório térmico. Atualmente, estes dispositivos representam a maior parte dos custos envolvidos devido ao uso de materiais nobres, tais como o aço inoxidável, o cobre e o alumínio. Para que o uso dos coletores solares seja difundido e alcance um preço de mercado compatível com a realidade das famílias de baixa renda é necessário que os custos dos materiais e dos processos de fabricação sejam reduzidos. Os polímeros são materiais sintéticos formados por grandes moléculas que possuem características técnicas específicas e desejáveis para a aplicação na construção de coletores solares, entre elas fácil moldagem, baixo peso e baixo custo.

Com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento de uma tecnologia de baixo custo e fácil instalação, este trabalho apresenta o desenvolvimento e construção de um protótipo de coletor solar utilizando material polimérico com o intuito de testar as variáveis inerentes ao processo. Foram realizadas simulações para o estudo de diversas geometrias de canais retangulares e seu impacto no desempenho térmico dos coletores e foram buscadas formas de desenho a fim de contornar o problema da baixa condutividade térmica dos polímeros. A partir dessas simulações, foi construído um protótipo de coletor solar, que foi ensaiado para determinação de seu desempenho térmico.

Os resultados apresentados foram promissores, mostrando que é possível o uso desses materiais sem que haja perda significativa de eficiência, além de mostrarem que existe a possibilidade de redução de seus custos de fabricação.

**Palavras-chave:** Energia solar térmica. Aquecimento de água. Coletores poliméricos.

## ABSTRACT

Solar energy is a clean, renewable energy that is standing out on the world stage, especially in developed countries like Japan, Germany and USA.

One of the applications in which the use of solar energy is currently growing is in domestic and industrial water heating.

In the Brazilian view, there is an incentive from Governo Federal to research papers aiming the development of the low-cost technologies for the use of solar thermal energy in low income families, thus, there is a reduction in the electricity consumption

A solar water heating system is essentially composed of collector and thermal reservoir. Currently, these devices represent the two most of the costs involved in their use due to the fine materials and high-cost process that are employed in the manufacture of both these equipments such as steel, copper and aluminum.

For the use of solar collectors is widespread and reach a market price compatible with the reality of low-income families is necessary that the cost of materials and manufacturing processes be reduced.

The polymers are synthetic materials formed by large molecules that have specific technical characteristics and desirable for application in the construction of solar collectors, including easy molding, low weight and low cost.

In order to assist in developing a low-cost technology and easy installation, this work presents the development and construction of a prototype solar collector using polymeric material to test the variables inherent in the use of this technology.

This work makes a bibliographic study on the types of polymeric materials for possible application, as well as an analysis of appropriate geometries. Finally a simulation was performed using the computer program ESS in order to determine: thermal performance, geometry and proper materials. Based on the data generated by the program, was designed and built a prototype flat plate solar collector in polymeric material. Finally tests was performed at the Laboratory of the University of Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS in order to determine the thermal performance of the collector.

**Keywords:** Solar termal energy, water heating, collectors polymer.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVOS .....	22
<b>1.1.1 Objetivo geral.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>22</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	22
1.3 METODOLOGIA.....	23
1.4 ESCOPO DO TRABALHO .....	23
<b>2 USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA .....</b>	<b>24</b>
2.1 POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO .....	24
2.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	26
2.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR .....	27
2.4 COLETOR SOLAR.....	28
<b>2.4.1 Coletor solar plano .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2 Materiais mais utilizados na construção de coletores .....</b>	<b>31</b>
2.4.2.1 Cobertura transparente.....	31
2.4.2.2 Placa absorvedora.....	32
2.4.2.3 Vedações.....	35
2.4.2.4 Isolamento .....	36
2.4.2.5 Estrutura de suporte .....	37
2.5 NOVOS MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE COLETORES .....	37
<b>2.5.1 Mobilidade interna e transições térmicas de polímeros.....</b>	<b>39</b>
2.6 COLETORES SOLARES POLIMÉRICOS.....	41
<b>2.6.1 Materiais para a cobertura.....</b>	<b>41</b>
<b>2.6.2 Placa absorvedora .....</b>	<b>45</b>
<b>3 MODELO MATEMÁTICO DE COLETORES SOLARES PLANOS.....</b>	<b>48</b>
3.1 MODELO DE HOTTEL-WHILLIER E BLISS .....	48
3.2 ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR.....	50
3.3 REFLEXÃO DA RADIAÇÃO .....	50
3.4 ABSORÇÃO PELA COBERTURA .....	52
3.5 PROPRIEDADES ÓTICAS DOS SISTEMAS DE COBERTURA DOS COLETORES .....	52

3.6	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA EQUIVALENTE PARA A RADIAÇÃO DIFUSA.....	54
3.7	PRODUTO TRANSMISSIVIDADE-ABSORTIVIDADE ( $\tau\alpha$ ) .....	55
3.8	DEPENDÊNCIA ANGULAR DE ( $\tau\alpha$ ) .....	56
3.9	PERDAS DE CALOR NO COLETOR.....	56
<b>3.9.1</b>	<b>Perdas térmicas pela cobertura.....</b>	<b>57</b>
<b>3.9.2</b>	<b>Transferência de Calor pelas Laterais e Fundo do Coletor .....</b>	<b>58</b>
3.10	COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	60
3.11	CONVECÇÃO NATURAL ENTRE A COBERTURA E PLACA ABSORVEDORA..	61
3.12	TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE PLACA ABSORVEDORA E FLUIDO DE TRABALHO .....	62
3.13	CONVECÇÃO FORÇADA PARA O ESCOAMENTO INTERNO NOS TUBOS.....	66
3.14	PERDAS DE CARGA NO COLETOR .....	67
3.15	TEMPERATURA DE ESTAGNAÇÃO DO COLETOR.....	68
3.16	TESTE DE COLETORES SOLARES PLANOS .....	69
3.16	CONDIÇÕES E PROCEDIMENTOS PARA TESTE.....	70
<b>4</b>	<b>PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS.....</b>	<b>73</b>
4.1	PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS POR EXTRUSÃO.....	74
<b>4.1.1</b>	<b>Processamento de Termoplásticos por Injeção.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Processamento de Termoplásticos: Moldagem por sopro .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Processamento de Termoplásticos por Termoformagem .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Definição do processo para a construção do coletor .....</b>	<b>79</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Soldagem de Termoplásticos .....</b>	<b>79</b>
<b>5</b>	<b>PROTÓTIPO DO COLETOR .....</b>	<b>81</b>
5.1	SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	81
5.2	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE COLETOR SOLAR POLIMÉRICO .....	85
<b>5.2.1</b>	<b>Dimensionamento do coletor .....</b>	<b>86</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Projeto do coletor e da matriz para termoformagem .....</b>	<b>87</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Termoformagem do protótipo.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Teste de desempenho do coletor solar.....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>1013</b>

**APÊNDICE A - PROJETO DO COLETOR SOLAR POLIMÉRICO.....1014**  
**APÊNDICE B - TABELAS.....1015**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Radiação Solar Global Horizontal Média Anual - Brasil .....	25
Figura 2.2 - Radiação Solar Global Horizontal Média Anual - Europa. ....	26
Figura 2.3 - Curva representativa do consumo de energia elétrica residencial .....	27
Figura 2.4 - Exemplo sistema de aquecimento solar, utilizando o princípio termosifão. ....	28
Figura 2.5 - Partes constituintes de um coletor solar.....	29
Figura 2.6 - Mecanismos da transferência de calor por radiação em um coletor solar plano ..	30
Figura 2.7 - Transmissividade do vidro com diversos teores de $Fe_2O_3$ .....	31
Figura 2.8 - Tipos de configurações de placa plana de coletores solares de absorção de água, (a) tubos como parte integrante da placa, (b) tubos presos a placa, (c) Tubos soldados a placa e (d) tubo retangular extrudado com a placa.....	33
Figura 2.9 - Modelos de fixação entre tubo e placa.....	34
Figura 2.10 - Valores de absorvidade e emissividade para revestimentos de placas absorvedoras planas.....	35
Figura 2.11 - Classificação de polímeros pela temperatura de serviço, estrutura e custo. ....	40
Figura 2.12- Amostras de vários tipos de policarbonatos expostos à radiação UV .....	43
Figura 2.13 - Transmissividade do policarbonato: (a) para comprimentos de onda até 2,2 $\mu m$ e (b) para comprimentos de onda maiores que 2,5 $\mu m$ .....	45
Figura 2.14 - Sistema de ventilação entre as placas para coletores.....	46
Figura 3.1 - Ângulo de incidência, reflexão e absorção do meio .....	46
Figura 3.2 - Raio traçado da transmissividade e a refletividade na cobertura.....	53
Figura 3.3 Radiação solar absorvida na placa. ....	55
Figura 3.4 - Curva para uma ou quatro coberturas.....	56
Figura 3.5 - Sistema com uma cobertura.....	57
Figura 3.6 - Configuração geométrica entre placa coletora e tubo.....	63
Figura 3.7 - Configuração geométrica entre placa coletora e tubo retangular .....	65

Figura 3.8 - Exemplo de circuito fechado para ensaios de coletores. ....	72
Figura 4.1 - Detalhe de uma extrusora de rosca utilizada para o processamento.....	75
Figura 4.2 - Máquina de injeção de pistão.....	76
Figura 4.3 - Etapas de termoformagem .....	77
Figura 5.1 - Curva de eficiência simulada para as geometrias de coletores solares.....	85
Figura 5.1 - Projeto do coletor solar polimérico (montagem total).....	859
Figura 5.3 - Detalhes da montagem da matriz para termoformagem do coletor solar polimerico.....	931
Figura 5.4 – Construção da matriz para termoformagem do coletor solar polimérico.....	932
Figura 5.5 – Máquina de termoformagem.....	933
Figura 5.6 – Placa do coletor após a termoformagem.....	934
Figura 5.7 – Coletor solar polimérico extraído da matriz.....	934
Figura 5.8 - Protótipo de um coletor solar plano polimérico aberto.....	93
Figura 5.9 - Protótipo de um coletor solar plano polimérico.....	93
Figura 5.10 - Disposição dos equipamentos e acessórios.....	94
Figura 5.11 - Posição das conexões de entrada e saída .....	95
Figura 5.12 – Sistema de aquisição de dados da bancada experimental .....	958
Figura 5.13 - Curva de desempenho térmico experimental do coletor.....	97
Figura 5.14 - Curva das temperaturas em função de $G_T$ .....	1000
Figura 5.15 - Dados medidos e simulados para a temperatura da placa absorvedora .....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Condutividade térmica dos materiais .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 2.2: Propriedades dos materiais de vedação utilizados em coletores planos .....	36
Tabela 2.3: Propriedade dos materiais de isolamento.....	37
Tabela 2.4: Temperatura de transição vítrea de termoplásticos amorfos.....	40
Tabela 3.1. Desvios permitidos durante os ensaios em regime permanente.....	69
Tabela 3.2. Incertezas dos dispositivos de medição utilizados.....	70
Tabela 3.3. Descrição dos equipamentos para teste de coletores conforme norma ABNT NBR 15747-2.....	72
Tabela 4.1: Calor específico, calor latente de fusão e propriedades de processamento para alguns polímeros.....	74
Tabela 5.1: Características técnicas para simulação dos coletores solares.....	82
Tabela 5.2: Dados das geometrias dos coletores para simulação .....	83
Tabela 5.3: Resultados da Simulação (Caso 1): .....	83
Tabela 5.4: Resultados da Simulação (Caso 2) .....	83
Tabela 5.5: Resultados da Simulação (Caso 3) .....	84
Tabela 5.6: Resultados da Simulação (Caso 4) .....	84
Tabela 5.7: Equipamentos utilizados na bancada de testes de coletores solares.....	84
Tabela 5.8: Posição dos acessórios.....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_c$	- Área do coletor solar de placa plana [m <sup>2</sup> ]
$A_e$	- Área de contorno do coletor solar de placa plana [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	- Área da placa do coletor solar de placa [m <sup>2</sup> ]
$A_{p,p}$	- Quatro vezes a área da placa dividida pelo seu perímetro [m]
$C_b$	- Condutância térmica da solda entre placa e tubo absorvedor [W/(mK)]
$C_p$	- Calor específico do fluido de trabalho [J/(kgK)]
$D$	- Diâmetro externo do tubo [m]
$D_h$	- Diâmetro hidráulico [m]
$D_i$	- Diâmetro interno do tubo [m]
$e$	- Altura da placa absorvedora [m]
$f$	- Fator de atrito de Darcy [-]
$F$	- Fator de eficiência da aleta [-]
$F_R$	- Fator de remoção de calor do coletor [-]
$F_x$	- Fator de eficiência da aleta de um coletor tubular [-]
$F'$	- Fator de eficiência do coletor [-]
$F''$	- Fator de fluxo do coletor [-]
$g$	- Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$G_T$	- Irradiância solar global incidente na superfície do coletor [W/m <sup>2</sup> ]
$h$	- Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$h_{c,p}$	- Coeficiente de transferência de calor por convecção natural entre as placas [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$h_{f,i}$	- Coeficiente transferência de calor por convecção no interior dos tubos [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$h_w$	- Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar externo [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$I_b$	- Irradiância direta solar global horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$I_d$	- Irradiância difusa solar global horizontal [W/m <sup>2</sup> ]
$I_g$	- Irradiância refletida pelo solo [W/m <sup>2</sup> ]
$I_i$	- Irradiância incidente [W/m <sup>2</sup> ]
$I_R$	- Irradiância refletida [W/m <sup>2</sup> ]
$K$	- Coeficiente de extinção [1/m]
$k$	- Condutividade térmica [W/(mK)]

$k_{ar}$	- Condutividade térmica do ar [W/(mK)]
$k_b$	- Condutividade térmica do isolamento da base do coletor [W/(mK)]
$k_c$	- Condutividade térmica do material da cobertura [W/(mK)]
$k_e$	- Condutividade térmica do isolamento de contorno do coletor [W/(mK)]
$k_p$	- Condutividade térmica do material da placa absorvedora [W/(mK)]
$K_{pressão}$	- Coeficiente de perda de carga localizada
$K_{\alpha}$	- Modificador do ângulo de incidência
$L_l$	- Comprimento do tubo do coletor [m]
$L_b$	- Espessura do isolamento de base do coletor [m]
$L_c$	- Largura externa do canal [m]
$L_{c,i}$	- Largura interna do canal [m]
$L_{c,p}$	- Distância entre a placa absorvedora e a cobertura [m]
$L_e$	- Espessura do isolamento de contorno do coletor [m]
$L_{eq}$	- Comprimento da placa absorvedora [m]
$L_{hi}$	- Altura interna do canal [m]
$L_{Larg}$	- Largura da placa absorvedora [m]
$m$	- Parâmetro de arranjo da aleta [-]
$\dot{m}_c$	- Taxa de massa de fluido no coletor [kg/s]
$N$	- Número de canais do coletor
$n_1$	- Índice de refração meio 1 [-]
$n_2$	- Índice de refração meio 2 [-]
$Nu$	- Número de Nusselt [-]
$P$	- Pressão [kPa]
$p$	-Perímetro do coletor [m]
$\Delta P_1$	- Perda de carga distribuída na tubulação [kPa]
$\Delta P_2$	- Perda de carga na entrada e saída dos tubos [kPa]
$\Delta P_{total}$	- Perda de carga total do coletor [kPa]
$Pr$	- Número de Prandtl [-]
$q$	- Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{1,i}$	- Fluxo de calor de entrada refletido pela placa [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{1,o}$	- Fluxo de calor de saída refletido pela cobertura interna [W/m <sup>2</sup> ]
$q_{2,i}$	- Fluxo de calor de entrada incidente [W/m <sup>2</sup> ]

$q_{2,o}$	- Fluxo de calor de saída refletido pela cobertura externa [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}_b$	- Taxa de calor perdido pelo fundo do coletor [W]
$\dot{Q}_e$	- Taxa de calor perdido pelas laterais do coletor [W]
$\dot{Q}_L$	- Taxa de calor total perdido pelo coletor [W]
$\dot{Q}_t$	- Taxa de calor [W]
$\dot{Q}_u$	- Taxa de transferência de calor útil [W]
$r$	- Reflexão da radiação [W/m <sup>2</sup> ]
$Ra$	- Número de Rayleigh [-]
$R_b$	- Razão entre a radiação direta incidente na superfície do coletor e na superfície horizontal [-]
$Re$	- Número de Reynolds [-]
$RTI$	- Índice térmico relativo [°C]
$S$	- Radiação absorvida pela placa por unidade de área [W/m <sup>2</sup> ]
$t$	- Horário angular [h]
$T_a$	- Temperatura ambiente [°C]
$T_c$	- Temperatura da cobertura [°C]
$\Delta T_{c,p}$	- Diferença de temperatura entre as placas [°C]
$T_{d,p}$	- Temperatura de orvalho [K]
$T_e$	- Temperatura externa da placa [°C]
$T_f$	- Temperatura do fluido [°C]
$T_{f,m}$	- Temperatura média do fluido [°C]
$T_i$	- Temperatura do fluido na entrada do coletor [°C]
$T_m^*$	- Temperatura reduzida [°C]
$T_{max}$	- Temperatura de estagnação [°C]
$T_o$	- Temperatura do fluido na saída do coletor [°C]
$T_p$	- Temperatura da placa [°C]
$T_{p,m}$	- Temperatura média da placa [°C]
$T_s$	- Temperatura do céu [°C]
$T_u$	- Temperatura do tubo [°C]
$u$	- Velocidade média do fluido dentro dos tubos [m/s]
$U_b$	- Coeficiente global de transferência de calor pelo fundo do coletor [W/(m <sup>2</sup> °C)]

$U_e$	- Coeficiente global de transferência de calor pelas laterais do coletor [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$U_L$	- Coeficiente global de perdas térmicas [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$U'_L$	- Coeficiente global de perdas térmicas pela cobertura [W/(m <sup>2</sup> °C)]
$V_{ar}$	- Velocidade do ar [m/s]
$W$	- Distância entre centros dos tubos da placa absorvedora [m]

### Letras gregas

$\alpha$	- Absortividade [-]
$\alpha_c$	- Absortividade do material da cobertura [-]
$\alpha_p$	- Absortividade do material da placa [-]
$\alpha_{ar}$	- Difusividade térmica do ar [m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	- Inclinação da placa coletora [°]
$\beta_{ar}$	- Coeficiente de expansão volumétrica do ar [1/K]
$\delta_p$	- Espessura da placa do coletor [m]
$\delta_p$	- Espessura da cobertura do coletor [m]
$\varepsilon$	- Emissividade [-]
$\varepsilon_c$	- Emissividade da cobertura para radiação infravermelha [-]
$\varepsilon_p$	- Emissividade da placa absorvedora [-]
$\eta_t$	- Eficiência térmica instantânea do coletor [%]
$\nu_{ar}$	- Viscosidade cinemática ar [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\theta$	- Ângulo de incidência da radiação solar não polarizada [°]
$\theta_{d,e}$	- Ângulo de incidência equivalente da radiação difusa [°]
$\theta_{g,e}$	- Ângulo de incidência equivalente da radiação refletida pelo solo [°]
$\rho$	- Refletividade [-]
$\rho_c$	- Refletividade da cobertura para radiação infravermelha [-]
$\rho_d$	- Refletividade da cobertura para radiação difusa [-]
$\rho_g$	- Refletividade do solo [-]
$\rho_p$	- Refletividade da placa absorvedora [-]
$\rho_l$	- Massa específica do fluido de trabalho [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	- Constante de Stefan-Boltzmann [W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
$\tau_a$	- Transmissividade do material devido à absorção de radiação [-]

- $\tau_c$  - Transmissividade da cobertura [-]  
 $\tau_r$  - Transmissividade do material devido à reflexão da radiação [-]  
 $\lambda$  - Comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]  
 $(\tau\alpha)$  - Produto transmissividade-absortividade [-]

### Sub-índices

- $b$  - Direta  
 $d$  - Difusa  
 $g$  - Refletida pelo solo  
 $\perp$  - Componente perpendicular  
 $//$  - Componente paralela

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPDM	Etileno Propileno Dieno
FEP	Etileno-Propileno Fluorado
GRP	Vidro Reforçado com Plástico
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
MDF	Fibra de Média Densidade
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PEEK	Policetona de Alto Desempenho
PEI	Polietirimida
PES	Poliéster
PE-X	Polietileno reticulado
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PPE	Polímero Éter Polifenileno
PPO	Oxido de Polifenileno
PPS	Polisulfeto de Polifenileno
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PS	Poliestireno

PSU	Polisulfona
PVC	Cloreto de Polivinila
PVF	Fluoreto de Polivinila
SENAI	Serviço Nacional da Indústria
TMY	Ano Meteorológico Típico ( <i>Typical Meteorological Year</i> )
UV	Ultra Violeta

## 1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar térmica emitida pelo Sol para aquecimento de água em substituição aos chuveiros elétricos no Brasil apresenta-se como uma boa alternativa para a diminuição dos custos de energia elétrica nas famílias de baixa renda.

O Brasil está compreendido entre as latitudes 2° Norte e 32° Sul, apresentando um potencial de aproveitamento energético solar de exploração inesgotável, disponível e acessível a toda a população.

A utilidade desse recurso pode se caracterizar como um meio de aumentar a oferta de energia no mercado, alavancando o desenvolvimento da indústria e minimizando o pico de consumo de energia elétrica que ocorre entre às 18h e 21h.

Segundo dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2010), a base energética brasileira é, em sua maior parte, hidráulica e cerca de 73,1% da população utiliza o chuveiro elétrico para aquecimento da água para banho. Conforme a ANEEL (2010), aproximadamente 43% do custo de uma conta de energia elétrica de uma família de baixa renda estão relacionados com o aquecimento da água.

De fato, o uso de chuveiros elétricos no Brasil para o aquecimento de água para banho é um aspecto que onera tanto para o consumidor residencial como também o sistema elétrico brasileiro. Enquanto o custo de aquisição desses equipamentos é relativamente baixo, da ordem de US\$ 30 a 60 (ou cerca de R\$ 60,00 a 120,00) para potências nominais variando de 4 a 8 kW, estima-se que o custo de expansão da rede para suprir a demanda elétrica no horário de pico seja de até US\$ 2.000 (ou cerca de R\$ 4.000,00) por chuveiro elétrico instalado (COLLE et al., 2004).

No entanto, o custo dos coletores solares existentes no mercado brasileiro atualmente (devido aos processos de fabricação, materiais, transporte, instalação e manutenção) dificulta sua utilização pelas classes menos favorecidas da população. Nesse contexto o desenvolvimento de novas tecnologias em projetos de coletores solares térmicos de alta durabilidade, baixo custo de produção, instalação, manutenção e elevado rendimento é o desafio para atender às necessidades do mercado brasileiro.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é projetar e desenvolver coletores solares planos construídos com materiais poliméricos para aquecimento de água e para substituição de chuveiros elétricos com a finalidade de beneficiar famílias de baixa renda no Brasil.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Identificar os possíveis materiais a serem empregados na construção dos coletores solares poliméricos planos e as geometrias adequadas, avaliando características técnicas, comparando-os aos coletores solares existentes no mercado atual;
- 2) ) Simular a operação desses coletores, utilizando um programa desenvolvido no EES (Silva, 2012), para analisar o efeito das características dos materiais empregados e a geometria do coletor no desempenho térmico;
- 3) Projetar e construir um protótipo de coletor solar plano polimérico com base nos parâmetros de material e geometria estudados e simulados no programa;
- 4) Realizar testes em laboratório para avaliar o desempenho do coletor polimérico construído.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos realizados e publicados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et. al, 2006), demonstram que o Brasil possui um potencial de captação de energia solar 50 mil vezes maior que a demanda nacional de energia.

Do consumo energético total no Brasil, o setor residencial corresponde a 10,5 %, sendo que 24% a 30% desta energia são empregadas no aquecimento de água com o uso do chuveiro elétrico, o qual é utilizado principalmente no horário de pico, das 18h às 21h (PROCEL, 2010).

Dessa maneira a substituição dos chuveiros elétricos por sistemas de aquecimento que utilizam coletores solares se apresenta como uma boa opção, revelando vantagens para o

sistema de distribuição de energia. Porém, para realizar essa substituição, seria necessário que o custo dos coletores fosse reduzido em aproximadamente 50%, fato que se revela como a principal dificuldade em difundir essa tecnologia em nosso país (KÖHL, 2005).

Nesse cenário, este trabalho revela particular importância no estudo e no desenvolvimento de novas tecnologias para a utilização da energia solar térmica com baixo custo, buscando beneficiar àqueles que não podem pagar pela implantação de coletores solares existentes no mercado atual.

### 1.3 METODOLOGIA

Inicialmente será apresentada uma análise bibliográfica para que seja feito um estudo dos parâmetros necessários à realização do trabalho. Na sequência, foram simuladas as variáveis que afetam diretamente a eficiência do processo de aquecimento de água através de coletores solares, utilizando assim, um programa computacional especialmente desenvolvido no software EES (*Engineering Equation Solver*).

Com base nesses cálculos projetou-se um coletor solar fazendo uso do software de CAD (*Computer Aided Design*) Solid Works.

A partir desse projeto foi construído um protótipo de coletor solar polimérico, onde foi testado em laboratório com a finalidade de avaliar o seu desempenho térmico.

### 1.4 ESCOPO DO TRABALHO

A partir do segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas: potencial energético brasileiro; consumo de energia elétrica no Brasil; sistema de aquecimento solar; coletor solar; novos materiais para construção de coletores e simulação do desempenho de coletores solares.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia utilizada.

No quarto capítulo é apresentado o processamento dos polímeros e, por fim, o último capítulo apresenta resultados obtidos e as conclusões do trabalho.

## 2 USO DA ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

A utilização da energia solar térmica, por meio de instalações de aquecimento solar tem se revelado como uma solução técnica e economicamente viável para os problemas de consumo de energia elétrica no setor residencial brasileiro (PEREIRA et al., 2003).

O aquecimento solar de água em habitações populares é um processo ativo de geração de energia térmica. As instalações solares térmicas residenciais podem ser projetadas unifamiliarmente, para edifícios e/ou condomínios residenciais. O aquecimento de água para uso doméstico, com o aproveitamento da energia solar, é considerada uma tecnologia simples (BRAZIL, 2002), mas cuidados devem ser tomados tanto no projeto quanto na escolha e instalação dos equipamentos, para que não haja falha de operação ou incremento do custo da energia consumida, o que poderá levar ao abandono do seu uso.

### 2.1 POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO

As aplicações da energia solar no Brasil são descritas em alguns trabalhos nos quais se destacam o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA e FRAIDENRAICH, 2000), o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et. al, 2006) e o Levantamento do Estado da Arte: Energia Solar (PRADO et. al, 2007), em que são disponibilizadas informações das médias mensais e anuais da irradiação diária incidente na superfície do território brasileiro, perfis de consumo de energia elétrica no setor residencial, além de exemplos de instalações e práticas adotadas no País.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006, apresenta as variáveis climáticas disponíveis, cujos dados desta base estão no formato TMY (Ano Meteorológico Típico), abrangendo as componentes global, direta e difusa da radiação solar, e ainda dados complementares meteorológicos como: temperatura ambiente e umidade relativa do ar, para vinte cidades brasileiras.

Os dados TMY de radiação solar foram obtidos pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e os demais componentes meteorológicos foram coletados de estações localizadas nos aeroportos de cada cidade em questão. Na Fig. 2.1 são apresentados os valores médios anuais da irradiação solar global incidente no território nacional (PEREIRA et. al, 2006).

Apesar das diferentes características climáticas do Brasil, a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo o país. A irradiação solar global diária média mensal incidente no território brasileiro está compreendida entre os valores de 4,25 a 6,65 kWh/m<sup>2</sup>, conforme a Fig. 2.1. O valor máximo da irradiação solar global média anual é de 6,50 kWh/m<sup>2</sup>, e ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí e a mais baixa é de aproximadamente 4,40 kWh/m<sup>2</sup>, registrada no litoral norte de Santa Catarina.

A irradiação solar global horizontal média anual incidente em qualquer região do território brasileiro (1550 - 2427 kWh/m<sup>2</sup>) é superior a da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>), França (900-1650 kWh/m<sup>2</sup>) e Espanha (1200-1850 kWh/m<sup>2</sup>), conforme pode ser visto na Fig. 2.1.

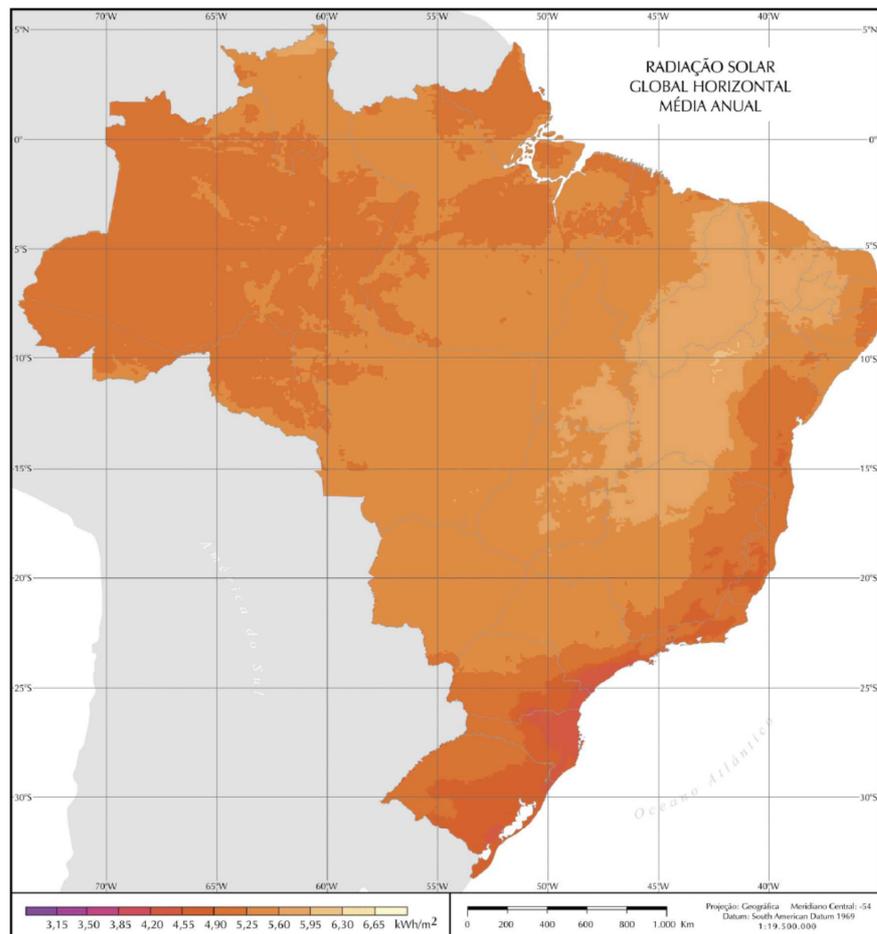


Figura 2.1 - Irradiação solar global horizontal média anual - Brasil

Fonte: PEREIRA et al. (2006)

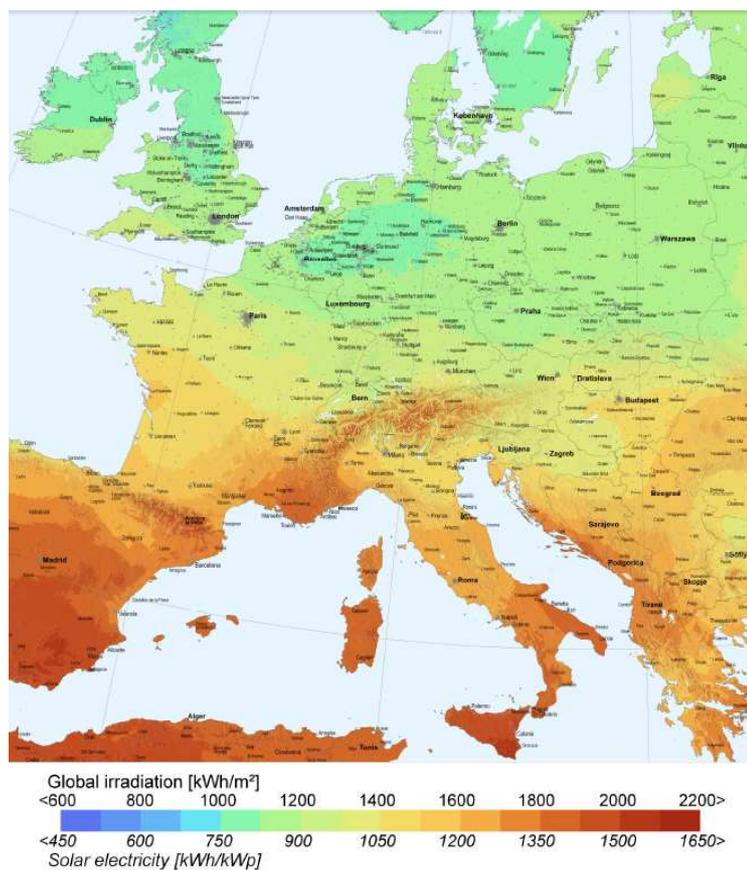


Figura 2.2 - Irradiação solar global horizontal média anual - Europa.

Fonte: <http://sunbird.jrc.it/pvgis/countries/europe.htm>

Conforme descrito por Tiba e Fraidenraich (2000), o Brasil é um país que em sua maior parte encontra-se em uma região intertropical, com um grande potencial não explorado da energia solar. De fato, a exploração desse recurso poderia acarretar em grande oferta de energia no mercado, o que alavancaria o desenvolvimento da indústria.

## 2.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Pode-se dividir o consumo de energia elétrica no Brasil entre os setores industrial, residencial e comercial. Ao seguir o enfoque principal deste trabalho, destaca-se o setor residencial, o qual representa o segundo maior segmento consumidor, abrangendo aproximadamente 24% de toda a demanda de energia elétrica no Brasil, sendo que o principal consumo diário ocorre entre às 18h e 21h, conforme mostrado na Fig. 2.3.

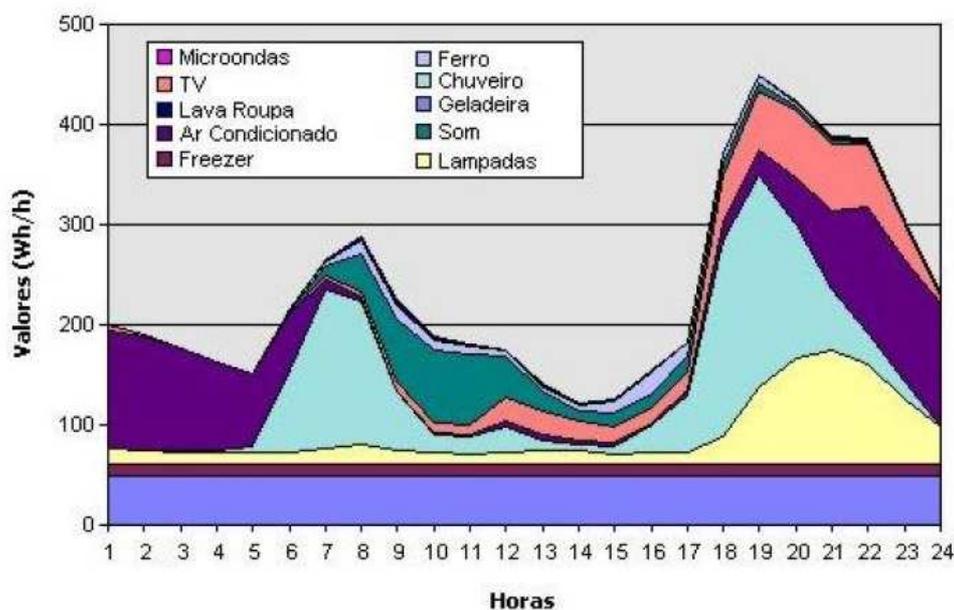


Figura 2.3 - Curva representativa do consumo de energia elétrica residencial

Fonte: PROCEL (2010)

Segundo a ANEEL (2010), um banho com chuveiro elétrico possui uma duração de aproximadamente 10 minutos por dia, totalizando 14,6 horas mensais, consumindo entre 3,6 a 6 kWh/mês. Ao considerar um custo médio da energia elétrica atual de R\$ 0,43 por kWh e que as famílias brasileiras possuem quatro pessoas em média, o banho quente representa um impacto significativo na conta mensal de energia elétrica para a população que depende da eletricidade para aquecimento da água.

### 2.3 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR

O sistema de aquecimento solar de água é, basicamente, constituído pelo coletor solar, reservatórios térmicos, e demais componentes que englobam uma fonte auxiliar de energia e uma rede de distribuição de água quente. Conforme exemplo mostrado na Fig. 2.4 para o caso de um sistema solar, operando com termosifão. A necessidade de um reservatório se deve ao fato da demanda de água quente não coincidir, na maioria das aplicações, com o período de insolação e em função da existência de dias nublados e chuvosos.

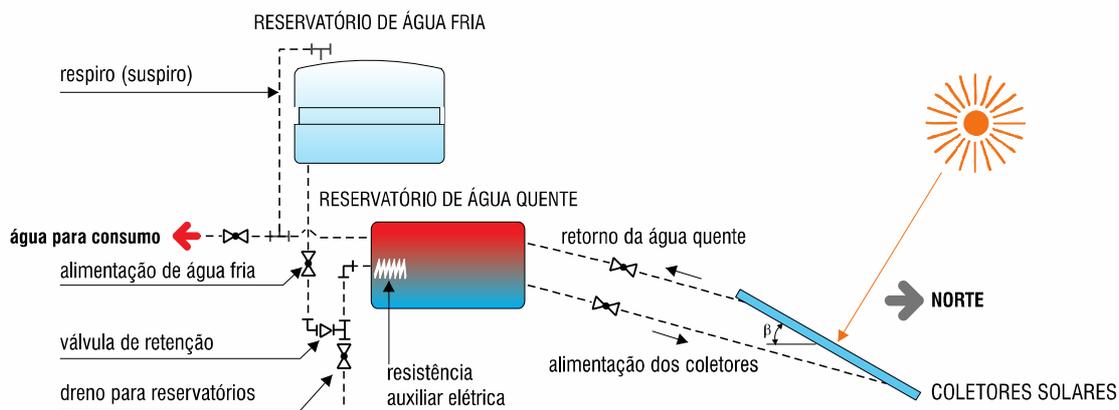


Figura 2.4 - Exemplo sistema de aquecimento solar, utilizando o princípio termosifão.

Fonte: PRADO et al. (2007)

## 2.4 COLETOR SOLAR

Os coletores solares são trocadores de calor especialmente desenvolvidos para converter a radiação solar em energia térmica e transferi-la para o fluido de trabalho.

Os coletores podem ser classificados como planos (com ou sem cobertura), tubos-evacuados ou concentradores. A definição da classe de coletores a ser utilizada no sistema irá depender do nível de temperatura requerido pelo processo e também da temperatura ambiente do local, pois irá influir nas perdas térmicas do coletor. Para aquecimento de água para banho as temperaturas são brandas, não ultrapassando os 40 °C e em que os coletores planos ou tubos-evacuados são satisfatórios.

Os coletores planos são os mais indicados para aquecimento de água doméstica em países tropicais devido à relação custo benefício, principalmente em locais onde a temperatura ambiente é mais amena, em torno de 18 a 28 °C, em média (PASSOS, 2011).

Os coletores de tubos-evacuados possuem bom desempenho térmico, visto que apresentam menor perda de calor para o ambiente devido a sua geometria e forma construtiva, que consiste basicamente de dois tubos de vidro de borossilicato colocados de forma concêntrica. O espaço anular entre o tubo exterior e o tubo interior é evacuado para diminuir a perda de calor por convecção, além de possuir elevada resistência ao envelhecimento e longa vida útil.

Os coletores de concentração, por sua vez, focalizam a radiação incidente que atinge um refletor parabólico ou lente Fresnel, por exemplo, para um absorvedor onde circula um

fluido térmico. Em virtude da concentração de energia em um absorvedor de área diminuta, o fluido alcança elevadas temperaturas, bem maiores que as atingidas pelos coletores planos ou de tubos evacuados. O coletor de concentração é montado sobre um mecanismo motorizado para realizar o rastreamento do movimento do sol, pois o ângulo de incidência da radiação solar deve ser correto para a focalização no absorvedor.

Para este estudo serão analisados somente os coletores planos, tendo em vista que o objetivo deste trabalho se concentra no desenvolvimento de uma solução de baixo custo.

### 2.4.1 Coletor solar plano

A eficiência de um coletor solar está em obter altos índices de absorção da radiação solar incidente e uma baixa perda de calor para o ambiente. A perda de energia nos coletores acontece pela combinação de mecanismos de convecção, radiação e condução de calor.

Os coletores solares planos são especificados para situações em que a exigência das temperaturas não atinge números muito elevados (máximo 100 °C acima da temperatura ambiente) (DUFFIE e BECKMAN, 2006). Os coletores solares absorvem, além da radiação solar direta, a radiação difusa. De um modo geral, sua forma construtiva é simplificada, tendo em vista que não acompanham o movimento do sol, reduzindo a necessidade de manutenção.

O esquema de um coletor solar plano é mostrado na Fig. 2.5. São formados por uma cobertura (1), uma placa absorvedora (2) e uma caixa isolada (3) para minimizar as perdas térmicas e fornecer a estrutura de suporte ao conjunto. A placa absorvedora é formada por um conjunto de tubos ou canais por onde circula o fluido de trabalho.

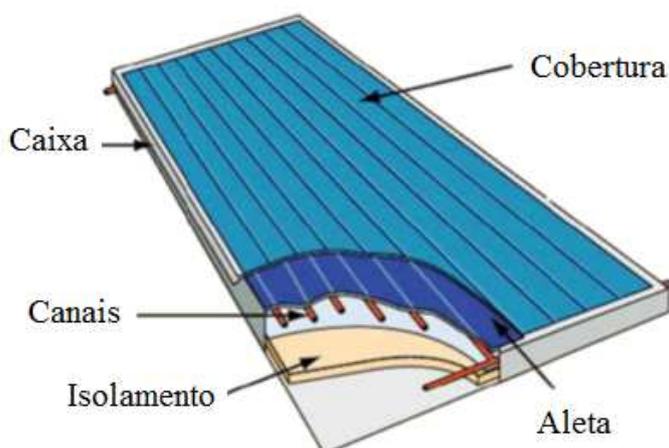


Figura 2.5 - Partes constituintes de um coletor solar plano

Fonte: Adaptado de Passos (2011)

A função de cada uma dessas três partes básicas pode ser descrita como:

1 – Cobertura semitransparente: sua função é reduzir as perdas de calor por convecção para a atmosfera através da camada de ar estagnada entre a cobertura e placa absorvedora. Também reduz as perdas por radiação entre placa absorvedora e o meio externo. Isso acontece porque o vidro, que é o material mais utilizado como cobertura, é transparente para a radiação de baixo comprimento de onda (proveniente do Sol) e opaco para a radiação no espectro do infravermelho (emitida pela placa absorvedora). Além disso, serve para proteger o absorvedor dos efeitos das intempéries.

2 – Superfície absorvedora: recoberta com pintura na cor escura ou com cobertura seletiva, tem a função de absorver a radiação solar e transferi-la ao fluido de trabalho.

3 - Isolamento: tem a função de minimizar a transferência de calor da placa absorvedora para o meio externo, através do fundo e das laterais. Também possui a função de estruturar o conjunto para melhor fixação mecânica em telhados ou afins e proteger o absorvedor das diferentes mudanças climáticas que podem vir contribuir para o processo inverso de resfriamento do fluido de trabalho.

As propriedades radiantes denominadas transmissividade ( $\tau$ ), refletividade ( $\rho$ ), absorvidade ( $\alpha$ ) e emissividade ( $\varepsilon$ ), importantíssimas na seleção de materiais utilizados na fabricação de coletores solares, dependem diretamente das características espectrais da radiação solar. De uma forma simplificada, pode-se afirmar que do total da radiação solar global incidente na superfície externa da cobertura uma fração sofre reflexão retornando ao meio externo, parte é absorvida pela cobertura e parte é transmitida para a placa absorvedora do coletor solar conforme mostra o esquema da Fig. 2.6. Assim, da radiação total, apenas uma parte será transmitida ao fluido de trabalho, resultando em um aumento de sua temperatura.

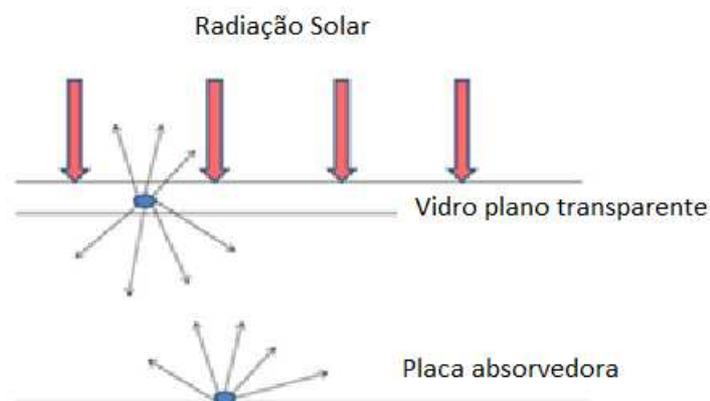


Figura 2.6 - Mecanismos da transferência de calor por radiação em um coletor solar plano

Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2006)

## 2.4.2 Materiais mais utilizados na construção de coletores

Os materiais escolhidos na construção de coletores solares irão desempenhar um papel importante para o desempenho do sistema. Assim, a seleção correta dos materiais de fabricação é de importância vital tanto para o bom desempenho térmico do sistema quanto para sua durabilidade e elevada vida útil (DUFFIE e BECKMAN 2006).

### 2.4.2.1 Cobertura transparente

O vidro é o material mais empregado para a cobertura dos coletores solares, pois é transparente no espectro da radiação solar de 0,3 a 2,8  $\mu\text{m}$  e opaco no espectro de emissão da placa absorvedora para comprimentos de onda maiores que 2,8  $\mu\text{m}$ . É desejável que o vidro da cobertura apresente transmissividade acima de 75%. Nota-se na Fig. 2.7 que os vidros com percentual de óxido de ferro em sua composição química abaixo de 0,1% apresentam transmissividade praticamente constante no espectro solar. Para comprimentos de onda maiores que 2,8  $\mu\text{m}$ , na faixa do infravermelho, a transmissividade diminui drasticamente e o vidro torna-se praticamente opaco.

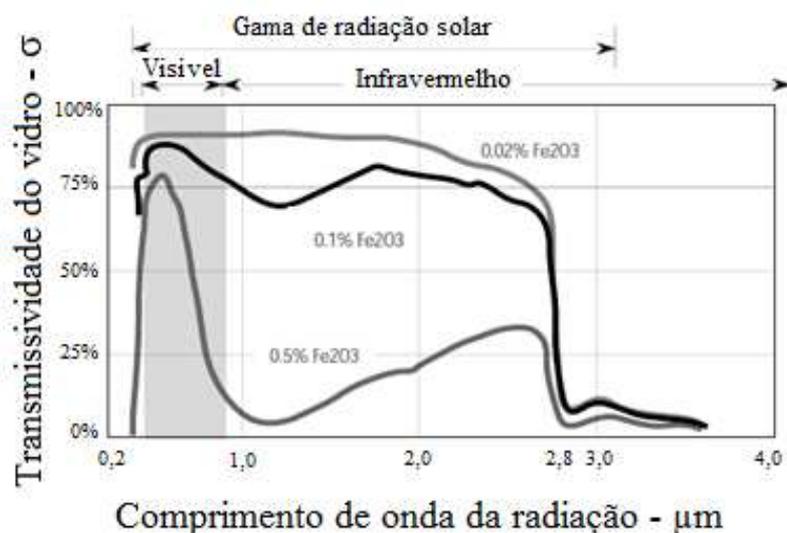


Figura 2.7 - Transmissividade do vidro para diferentes teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2006)

#### 2.4.2.2 Placa absorvedora

A placa absorvedora é o principal componente de um coletor solar. Os materiais mais utilizados são os metálicos, principalmente cobre e alumínio. Sob esta placa estão dispostos os tubos ou canais por onde circula o fluido de trabalho, conforme exemplos mostrados na Fig.2.8.

Um coletor solar eficiente deve absorver a radiação solar incidente e convertê-la em energia térmica para aquecer o fluido de trabalho com um mínimo de perdas em cada passo. Um grande problema é a obtenção de um contato térmico entre tubos e a placa absorvedora, sem que ocorram custos excessivos na construção ou nos materiais empregados (KALOGIROU, 2009).

A Fig. 2.8 mostra uma série de configurações da placa de absorção em coletores de aquecimento solar de água. A Fig. 2.8a mostra uma geometria na qual as passagens do fluido são parte integrante da placa a fim de garantir um contato térmico adequado entre o metal e o fluido. As Figuras 2.8b-c mostram placas com tubos soldados ou presos às superfícies superior e inferior das chapas metálicas. A Fig. 2.8d mostra o uso de tubo retangular extrudado para obter uma maior área de transferência de calor entre o tubo e a placa.

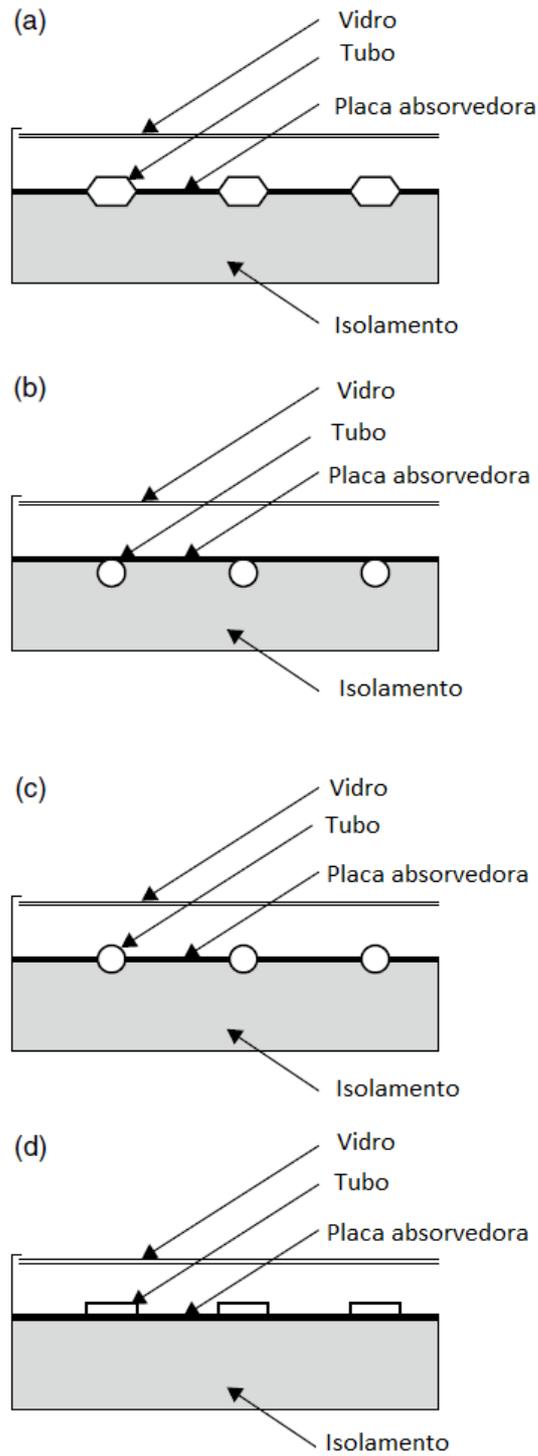


Figura 2.8 - Tipos de configurações de placa plana de coletores solares de absorção de água, (a) tubos como parte integrante da placa, (b) tubos presos a placa, (c) Tubos soldados a placa e (d) tubo retangular extrudado com a placa.

Fonte: Adaptado de KALOGIROU (2009)

Há vários mecanismos de fixação entre a placa e os tubos de cobre como por exemplo, através de pressão, solda, juntas térmicas, cliques, grampos, ou fios retorcidos (KALOGIROU, 2009). O objetivo básico dessa fixação é diminuir a resistência de contato entre esses dois elementos. Alguns exemplos são apresentados na Fig. 2.9.

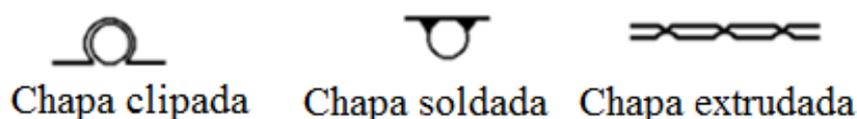


Figura 2.9 - Modelos de fixação entre tubo e placa.

Fonte: (PANAPAKIDIS, 2010).

A transferência de calor para o fluido depende da condutividade térmica do material de placa, da fixação entre o tubo e a placa, e da distância entre as passagens de fluido. Alguns materiais possuem alta condutividade térmica, tais como o cobre e alumínio, conforme apresentado na Tab. 2.1 e são comumente utilizados na construção, sendo que os tubos de cobre são usados na maioria das vezes em função de sua resistência superior à corrosão.

Novas técnicas estão sendo aprimoradas para utilização de plásticos de engenharia para fornecer uma boa ligação mecânica entre o absorvedor e a placa (PANAPAKIDIS, 2010).

Tabela 2.1 - Condutividade térmica de alguns materiais utilizados em coletores solares térmicos

Material	Condutividade térmica (W/mK)
Cobre	376
Alumínio	205
Polietileno	0,30-0,44
Polipropileno	0,20
PVC (Policloreto de vinila)	0,16

Fonte: Adaptado de PANAPAKIDIS (2010).

Na construção de coletores solares, geralmente é aplicado na superfície do absorvedor um revestimento com elevada absorção da radiação solar. Dois tipos básicos de revestimentos estão disponíveis e podem ser classificados como não seletivos e seletivos.

Os revestimentos não seletivos possuem elevada absorção da radiação solar, mas também apresentam elevada emissividade no espectro do infravermelho. Os materiais

utilizados para os não seletivos incluem tinta negro mate com base em resina acrílica de poliéster e epóxi. Os pigmentos mais comuns são óxido de carbono de ferro negro, grafite amorfo, negro de osso e bases de asfalto.

Já os revestimentos seletivos possuem uma elevada absortividade da radiação solar conforme Fig. 2.10, mas também apresentam uma baixa emitância no espectro do infravermelho. São utilizados para esta aplicação revestimentos de diversos materiais:

- Cromo preto: demonstram uma pequena mudança nas propriedades óticas para longos períodos de tempo e quando submetidos a temperaturas elevadas;
- Níquel preto: menos estável, além de apresentar degradação com a exposição à temperatura e à umidade;
- Óxidos de cobre, cobalto e zinco: mostram deterioração significativa com a exposição ao sol.
- Cobertura à base de deposição física de vapor a vácuo: nova tecnologia que garante durabilidade e elevada resistência ao tempo.

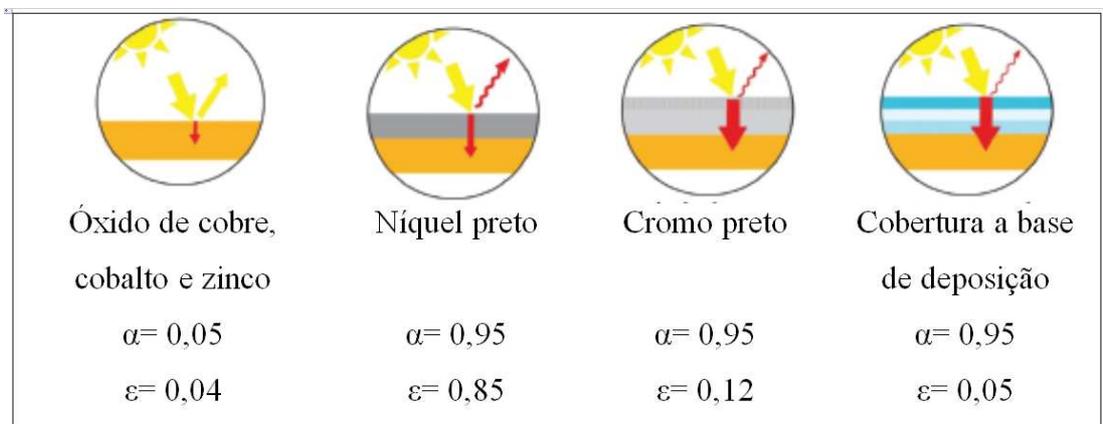


Figura 2.10 - Valores de absortividade e emissividade para revestimentos de placas absorvedoras planas.

Fonte: Braendle (2010).

#### 2.4.2.3 Vedações

Os materiais utilizados para vedação são aplicados para assegurar que as condições do coletor solar não sejam afetadas pelo tempo e condições adversas, impedindo a penetração de umidade. Os materiais mais comumente utilizados são borrachas de EPDM, silicone, neoprene e buteno. As propriedades importantes dos materiais de vedação são a sua

resistência à temperatura, propriedades mecânicas e resistência às condições atmosféricas. Algumas propriedades dos materiais mais adequados são apresentadas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades dos materiais de vedação utilizados em coletores planos

<b>Materiais</b>	<b>Temp. de trabalho (°C)</b> <b>Min e Max</b>		<b>Deformação até a ruptura (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Resistência à intempérie</b>	<b>Resistência à umidade</b>
Acrílico	-40	30	400	3	2	4	1
Butil	-50	25	800	2-3	2	4	2-4
Neoprene	-20	30	600	3-4	2-3	4	3
Polietileno	-40	20	500	1-2	2	4	3-4
EPDM	-40	50	600	3-4	2	4	4
Fluorelastômeros	-40	30	300	3-4	3	4	4
Silicone	-60	30	700	2-4	3	4	3-4
Uretanos	-50	00	700	1-4	3	4	1-2

(4=excelente, 3=boa, 2=razoável, 1=pobre)

Fonte: PANAPAKIDIS, 2010.

Borrachas acrílicas não possuem boa resistência à água e aos processos de fluência e, portanto, não são adequadas para aplicação em coletores. O desempenho das borrachas de EPDM, neoprene e silicones são relativamente satisfatórios.

#### 2.4.2.4 Isolamento

A camada de material isolante reduz as perdas de calor pela parte inferior e lateral do coletor solar. Os materiais mais utilizados no isolamento são as fibras de vidro, fibra mineral, espuma de poliestireno, espuma de poliuretano e espuma de polietileno.

Algumas propriedades dos materiais de isolamento são apresentadas na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Propriedade dos materiais de isolamento

Material	Condutividade térmica a 24°C (W/mK)	Temperatura de trabalho máxima (°C)
Fibra de vidro (placa)	0,032	343
Fibra mineral	0,036-0,055	649-1037
Espuma de vidro	0,058	
Espuma de poliestireno	0,029-0,039	74
Espuma de poliuretano	0,023	104
Espuma fenólica	0,033	135
Plástico celular	0,040	100

*Fonte:* PANAPAKIDIS (2010).

O material de isolamento de um coletor solar deve ser capaz de suportar as temperaturas elevadas e ter grande propriedade de isolamento. Um dos principais problemas que ocorre a temperaturas elevadas é a vaporização dos componentes químicos do material de isolamento, como por exemplo, o que acontece com as espumas poliméricas que podem desgaseificar. Outros materiais como fibra de vidro e fibra mineral são excelentes isolantes térmicos, pois possuem uma elevada temperatura de trabalho e são de fácil aquisição e baixo custo.

#### 2.4.2.5 Estrutura de suporte

As estruturas que acondicionam os elementos básicos de um coletor solar (cobertura, placa absorvedora e isolamento) são fabricadas em alumínio e aço galvanizado com baixo teor de carbono. Em alguns casos pode ser utilizado também polipropileno, PVC (policloreto de vinila) e aço inoxidável. Muitos materiais como o aço inoxidável e alumínio possuem boas propriedades mecânicas quando expostos ao tempo, mas elevam o custo de fabricação. Os aços com baixo teor de carbono são mais baratos, mas a resistência à exposição e à intempérie é baixa.

## 2.5 NOVOS MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE COLETORES

Os coletores solares planos, em sua maioria, são fabricados com materiais metálicos, não havendo ainda uma expansão significativa do uso de materiais poliméricos para o desenvolvimento dessa tecnologia, com exceção dos coletores para aquecimento de água em piscinas. Atualmente o custo de fabricação de um coletor solar é alto comparado ao padrão sócio econômico brasileiro, ao compararem-se as vantagens de um coletor polimérico, podem-se citar várias premissas como baixo custo do material e dos processos de fabricação, baixo custo de transporte e facilidade de instalação devido ao seu baixo peso.

Existem vários desafios para o uso de coletores solares poliméricos. Entre eles destacam-se o desenvolvimento de materiais resistentes à temperatura e a exposição aos raios ultravioletas, o custo e os processos de fabricação, a vida útil compatível com os coletores metálicos e o menor rendimento que esses coletores apresentam.

A viabilidade econômica dos sistemas solares para aquecimento de água é fortemente relacionada com o custo dos coletores. Os custos totais deveriam ser reduzidos em 50% para permitir a penetração significativa no mercado (KÖHL, 2005). Uma abordagem atraente para redução de custos é substituir o vidro e as peças de metal por materiais com custo mais acessível e com baixo peso. A redução de peso irá diminuir o custo do transporte, manuseio e instalação. A utilização de materiais poliméricos também permitirá a redução dos custos associados aos processos de fabricação como a redução do número de peças, facilidades de montagem nas linhas de produção, facilidade de logística e a instalação. Um desafio chave é manter o desempenho adequado do sistema e garantir a durabilidade necessária para vidas tão longas quanto aos dos sistemas tradicionais. Esse conceito começa a ser reconhecido e aceito em todo o mundo. O ambiente onde os materiais serão expostos é em geral muito agressivo, pois deve suportar os efeitos da radiação UV, altas temperaturas, umidade elevada, chuva, condensação, poluentes do ar, etc. Polímeros podem ser muito sensíveis à radiação UV, especialmente em combinação com altas temperaturas. A escolha de polímeros para aplicações solares requer grande cuidado, especialmente em coletores, devido ao fato de que a sua durabilidade é geralmente menor do que a dos materiais que substituem, mas oferecem significativas vantagens de fabricação. Materiais como poliéster, PEEK, PPS, PEI, PSU, são polímeros com boa resistência à temperatura e aos raios UV. No entanto, alguns deles podem ser difíceis de manufaturar, além de possuírem um alto custo e limitações do mercado fornecedor. Uma alternativa para encontrar o "melhor" tipo de polímero pode ser aceitar uma vida útil limitada, mas usar uma construção que permita uma substituição fácil (KÖHL, 2005).

### 2.5.1 Mobilidade interna e transições térmicas de polímeros

Polímeros são macromoléculas compostas de unidades estruturais repetitivas. Através do processo de polimerização, muitas moléculas pequenas (monômeros) são combinadas e conectadas através de ligações químicas covalentes.

O comportamento dos materiais poliméricos depende do tempo e da temperatura (comportamentos de fluência e relaxamento) e é uma consequência direta das características estruturais específicas de cada polímero e das interações fracas entre suas moléculas.

Em temperaturas muito baixas a mobilidade interna em materiais poliméricos se limita à vibração de grupos de moléculas sem rearranjos moleculares. Nas chamadas transições térmicas secundárias, que é para muitos polímeros em torno de  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rearranjos moleculares, tais como rotações de grupos laterais ou segmentos da cadeia principal sob uma ligação covalente são induzidos.

Na temperatura de transição vítrea (temperatura na qual o polímero torna-se duro e quebradiço) grandes segmentos da cadeia principal polimérica iniciam uma rotação, o que resulta em rearranjos cooperativos de segmentos macromoleculares. Um requisito primordial para a mobilidade da cadeia principal é um espaço livre entre as macromoléculas associadas através da diminuição acentuada das forças de ligação secundárias. Dependendo do tipo do polímero, a temperatura de transição vítrea varia entre  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (por exemplo, elastômeros) a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (por exemplo, poliamida). A Tab. 2.4 resume os valores da temperatura de transição vítrea de alguns materiais poliméricos amorfos (KÖHL et al., 2012).

Tabela 2.4: Temperatura de transição vítrea de termoplásticos amorfos

Polímero	Abreviação	T, °C
Cloreto de polivinila	PVC	70
Poliestireno	PS	95
Metacrilato de polimetil	PMMA	105
Policarbonato	PC	150
Óxido polifenileno	PPO	190
Polisulfeno	PSU	190
Polieterimida	PEI	220
Polietersulfonas	PES	230

*Fonte:* Adaptado de KÖHL et al. (2012)

Materiais poliméricos para coletores solares representam algumas variáveis críticas entre propriedades de materiais, processamento e custo. Sistemas atuais propõem utilizar principalmente materiais poliméricos termoplásticos. Termoplásticos representam uma grande

parte do mercado de polímero, aproximadamente 65%, devido à facilidade de manufatura e reciclagem. Dentro dos termoplásticos existem três classificações de materiais de acordo com as propriedades e fatias de mercado: termoplástico padrão, plásticos de engenharia e polímeros de alto desempenho, como representados na Fig. 2.11. Os materiais termoplásticos padrão compõem 90% da fatia de mercado. São materiais de baixo custo e possuem uma baixa temperatura de processamento ( $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Os plásticos de engenharia, assim como os polímeros de alto desempenho, juntos compõem os outros 10% do mercado e possuem um custo expressivamente mais elevado que os termoplásticos padrões. A temperatura de serviço para os plásticos de engenharia varia entre  $100$  e  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Já para os polímeros de alto desempenho excedem os  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uma temperatura de serviço elevada representa maiores custos de processamento, bem como maiores desafios associados às limitações do processo.

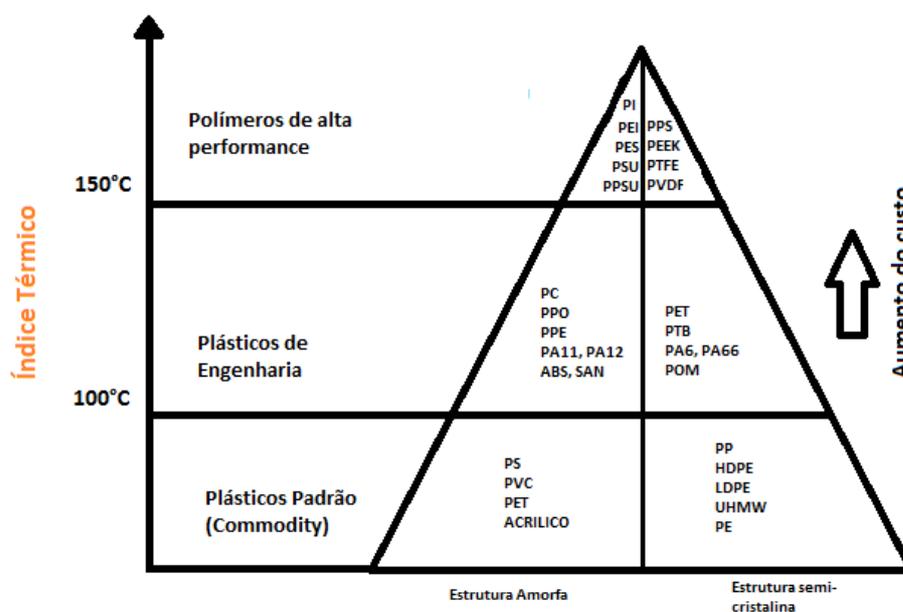


Figura 2.11 - Classificação de polímeros pela temperatura de serviço, estrutura e custo.

Fonte: Adaptado de BOURNE E LEE (2004).

Assim, a utilização de polímeros na construção de coletores solares está relacionada ao custo e desempenho, pois a aplicação envolve altas temperaturas, consequentemente é desejável polímeros com maiores temperaturas de serviço e infelizmente com maiores custos. Para reduzir custos, alguns pesquisadores têm explorado formas construtivas que limitam a temperatura do componente, utilizando termoplástico padrão (BOURNE E LEE, 2004).

## 2.6 COLETORES SOLARES POLIMÉRICOS

Sabe-se que no futuro, materiais nobres como o cobre e o alumínio serão uma matéria prima cara para ser utilizada como absorvedor térmico. Neste contexto novos materiais poliméricos estão sendo estudados para uso em sistemas de aquecimento solar de água, em termos de funcionalidade e design. Simultaneamente, a competitividade econômica pode ser melhorada através da redução dos custos dos sistemas, conduzindo assim a uma maior penetração no mercado.

O estudo de coletores solares poliméricos não é novo. Edlin (1958) estudou o uso de filmes plásticos transparentes em substituição ao vidro e determinou algumas propriedades óticas e mecânicas desse material. No seu trabalho pioneiro, Tabor (1961) já citava a possibilidade do uso dos novos materiais para cobertura dos coletores, o PVC transparente, e os problemas decorrentes da elevada transmissividade desse material para a radiação na faixa do infravermelho. Blaga (1978) realizou uma ampla revisão do estado da arte do uso de materiais poliméricos em coletores solares, exceto como absorvedor, apresentando dados sobre o envelhecimento desses materiais quando expostos a condições externas e em câmaras climáticas.

A construção de coletores utilizando materiais poliméricos para aplicações em temperaturas abaixo de 60 °C foi estudada por Addeo et al. (1980), analisando o desempenho e eficiência de protótipos e obtendo resultados satisfatórios.

O estudo da substituição do absorvedor metálico por polímeros iniciou na década de 1990. Van Niekerk (1996) realizou uma pesquisa utilizando coletores com tubos de polipropileno e placa absorvedora de polietileno de alta densidade, em uma configuração similar aos coletores metálicos tradicionais, analisando o efeito dos parâmetros geométricos na sua eficiência, tais como número de tubos em paralelo, espaçamento entre tubos, diâmetros, etc.

Recentemente, vem sendo realizado uma série de estudos com o objetivo de analisar o desempenho de novos coletores solares construídos a partir da utilização de materiais poliméricos, incluindo testes realizados utilizando a exposição prolongada em condições ambientais externas dos diferentes materiais. Isso ocorre em vários locais dos Estados Unidos, da Europa e ensaios acelerados em câmaras climáticas.

### 2.6.1 Materiais para a cobertura

Diversos estudos estão sendo desenvolvidos na análise de novos compostos poliméricos para serem utilizados em coberturas de coletores, com o intuito de evitar a degradação ótica e mecânica (amarelamento e ressecamento) causada pela exposição à temperatura e à radiação UV.

As coberturas devem ter transmissividade elevada em todo o espectro solar e baixa transmissividade no espectro do infravermelho e devem ser capazes de resistir a longo prazo de tempo (10 a 20 anos de exposição) para condições de serviço, incluindo altas temperaturas de operação e exposição aos raios ultravioletas (UV). Também devem manter a integridade mecânica (por exemplo, resistência ao impacto e a rigidez). Esforços recentes têm enfatizado a avaliação e identificação de novos candidatos com durabilidade ótica e mecânica durante a exposição a condições de serviço reais e em simulação. No passado, algumas empresas incorporaram coberturas de materiais poliméricos em seus coletores, durante o início dos anos 1980. O Brookhaven National Laboratory desenvolveu uma cobertura de coletor com base em uma película de polímero laminado, o fluoreto de polivinila (PVF - Tedlar®). A principal desvantagem deste sistema foi relacionada com as limitações tecnológicas da época, referente às ligações poliméricas, conforme comentado por Jorgensen et al. (2005).

Entre 1983 e 1987, a Reynolds Metal Company trabalhou no desenvolvimento de coberturas feitas com uma película fina de polímero muito semelhante ao Projeto do Brookhaven. Em meados de 1980, a Acurex testou um grande número de materiais poliméricos para cobertura de coletores solar, dos quais o Tedlar® foi novamente selecionado, mas após os testes demonstrou uma vida útil de apenas 5 a 6 anos quando exposto aos raios UV (Jorgensen et al., 2005).

A Ramada Energy Systems desenvolveu um coletor de tubo-polimérico durante a década de 80. A cobertura era constituída por um filme laminado e extrudado com parede de canais duplos em policarbonato (PC), sendo que a maioria dos problemas associados a este sistema foi relacionada ao fornecimento de matéria prima e outras questões não técnicas. Na Europa, a Stiebel Eltron fabricou um coletor com cobertura de acrílico e um filme de poliéster, embora muitos destes sistemas ainda se encontrem em uso, a película de poliéster é facilmente rasgada (Jorgensen et al., 2005).

Vários arranjos poliméricos com filmes de policarbonato foram analisados para a construção de coletores e foram submetidos à exposição acelerada ao tempo e a níveis de intensidade de radiação UV de 50 sóis para um período de até 20 anos de exposição ao ar

livre em Miami, FL, EUA, cujos resultados, em termos da perda de transmissividade ao longo do tempo e dose de exposição, estão descritos na Fig. 2.12.

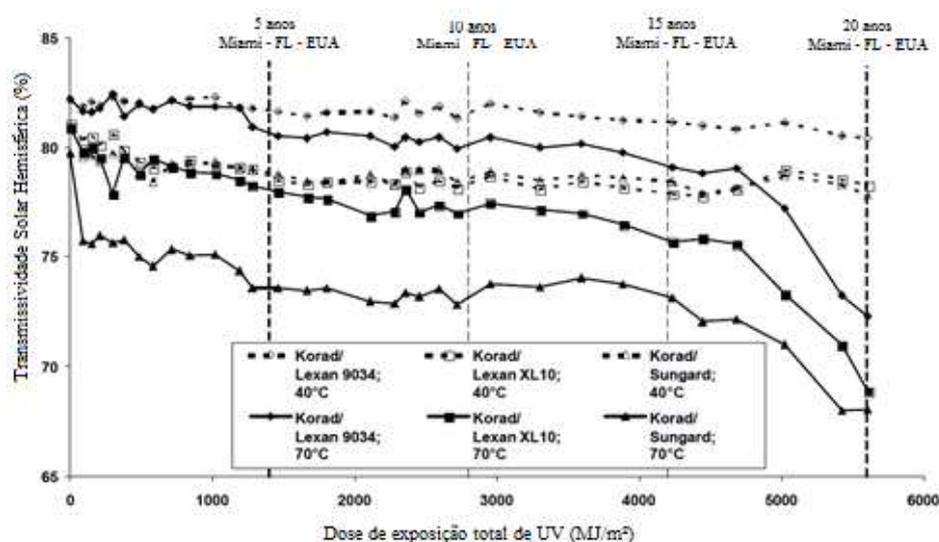


Figura 2.12- Amostras de vários tipos de filmes de policarbonato expostos à radiação UV

Fonte: JORGENSEN et al. (2005)

A queda na transmissividade solar no filme de policarbonato (Korad/Sungard) quando exposto à radiação UV de 50 sóis a 70 °C é maior quando comparada aos outros arranjos poliméricos. Quando a temperatura de exposição é baixa, como acontece com o Korad/Lexan 9034 exposto a 40 °C, a transmissividade solar permanece praticamente a mesma durante toda sua vida útil. Quando comparado ao Korad/9034 exposto a 70 °C, a queda na transmissividade é baixa e esta o torna de grande importância para coletores que possuem baixas temperaturas de trabalho e de estagnação.

A construção mais promissora usa um filme de policarbonato (PC). Sem esta camada a cobertura apresenta perda de 3 a 5% no desempenho quando exposta de 2 a 3 anos. Além disso, ocorre um grave amarelamento da superfície.

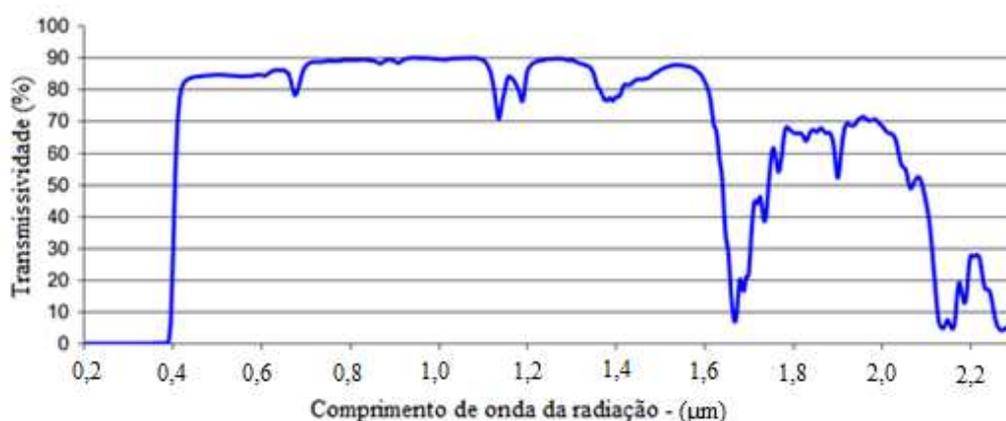
Outro estudo foi desenvolvido por Kahlen et al. (2010) com um filme de PC e envelhecimento a diferentes temperaturas em ar quente e água quente. Os resultados foram satisfatórios quanto à vida útil e à exposição ao tempo na utilização em coberturas de coletores.

Atualmente são utilizados para este fim o acrílico, o policarbonato e o vidro reforçado de poliéster, materiais que possuem boas propriedades óticas. O PVF (fluoreto de polivinila) e o FEP (etileno-propileno fluorado) apresentam melhor transmissividade no espectro de

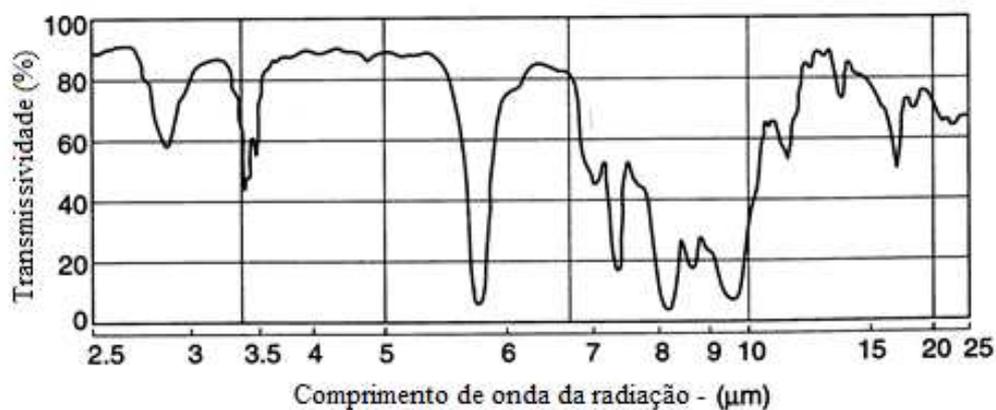
radiação solar. Outros polímeros, tais como GRP (vidro reforçado com plástico) e o policarbonato podem ser estabilizados para evitar a deterioração pela ação da radiação UV, porém este é um processo de alto custo.

O policarbonato é o material mais empregado na construção de acessórios de proteção individual ou de máquinas. Esta gama de aplicações deve-se às suas propriedades, como por exemplo, possuir boa transparência, fácil moldagem, grande resistência a impactos e fácil aquisição no mercado.

A Fig. 2.13(a) apresenta a transmissividade do policarbonato em função do comprimento de onda. Nota-se que a transmissividade é praticamente constante na faixa de comprimentos de onda entre 0,4 a 1,6  $\mu\text{m}$ , com picos distribuídos em alguns comprimentos de onda. Para comprimentos de onda maiores que 1,7  $\mu\text{m}$ , na faixa do infravermelho, a transmissividade apresenta uma queda brusca, voltando a subir após esse pico e diminuindo outra vez para comprimentos de ondas perto de 2,2  $\mu\text{m}$ . Esse comportamento se repete para comprimentos acima de 2,5  $\mu\text{m}$ , como pode ser visto na Fig. 2.13(b). A elevada transmissividade para comprimentos de onda da faixa da energia solar, principalmente no visível, é importante para o desempenho do coletor solar. Ao mesmo tempo, as elevadas transmissividades para a faixa do infravermelho significam que o material não é opaco à radiação, como no caso do vidro, mostrado na Fig. 2.7, incrementando suas perdas térmicas para o meio.



(a)



(b)

Figura 2.13 - Transmissividade do policarbonato: (a) para comprimentos de onda até 2,2  $\mu\text{m}$  e (b) para comprimentos de onda maiores que 2,5  $\mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de (a) Makrolon Polycarbonate Data Sheet e (b) DUFFIE e BECKMAN (2006)

### 2.6.2 Placa absorvedora

Kahlen et al. (2010) investigaram outros materiais poliméricos quanto à sua aplicabilidade nas placas absorvedoras para coletores solares. O estudo analisou o envelhecimento de plásticos de engenharia, incluindo dois polímeros amorfos, o PPE + PS e o PC além de dois outros polímeros semi-cristalinos (dois tipos de poliamida). O foco da investigação foi o estudo do comportamento do envelhecimento destes materiais em condições máximas de funcionamento (em água a 80 °C e até 16.000 h) e às condições de estagnação (no ar a 140 °C e até 500 h). Ao comparar as duas condições de envelhecimento em ar quente e água quente, os autores concluíram que o PP e o PE-X são candidatos promissores para aplicações em coletores solares.

As elevadas temperaturas do sistema de aquecimento de água são preocupantes para a maioria dos polímeros, visto que pode haver problemas como fusão, fluência e fragilização do material.

As temperaturas típicas de fusão do PE-X e do PP são aproximadamente 130 a 160 °C, respectivamente, e assumindo não haja nenhuma proteção contra superaquecimento, o PE não seria um bom material para uma placa absorvedora de um coletor solar.

O RTI (Índice Térmico Relativo) consiste na temperatura em que o material perde 50% de suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, tensão ou rigidez) após ser mantido 100.000 horas nessa temperatura.

O RTI do óxido de polifenileno de sulfito (PPS) é de 105 °C e do propileno (PP) 115 °C, ambos materiais utilizados como absorvedores.

Um grande problema enfrentado pelos polímeros de baixo custo é a temperatura de degradação quando o coletor opera em temperatura de estagnação, ou seja, quando a irradiação sobre a superfície do coletor é elevada e a vazão do fluido de trabalho é nula.

Proteção contra sobre aquecimento pode ser definida como o mecanismo utilizado para manter a temperatura de um colector solar térmico abaixo de um determinado valor. Para limitar a temperatura podem-se impor perdas térmicas ao coletor. Os principais mecanismos para aumentar as perdas no sistema são:

- Redução do ganho ótico utilizando superfícies de cobertura menos eficientes, ou seja, transparentes tanto no espectro da radiação solar como também no espectro de emissão da placa, permitindo a passagem da radiação emitida pela placa absorvedora diretamente para o meio circundante;
- *Dumping*: reposição de água quente pela fria através de uma recirculação externa que envolve válvulas e mecanismos de controle de temperatura;
- Ventilação entre a cobertura e o absorvedor ou através de uma abertura abaixo do absorvedor, ou ambos, como mostrado na Fig. 2.14, segundo Burch e Jorgensen (2006).

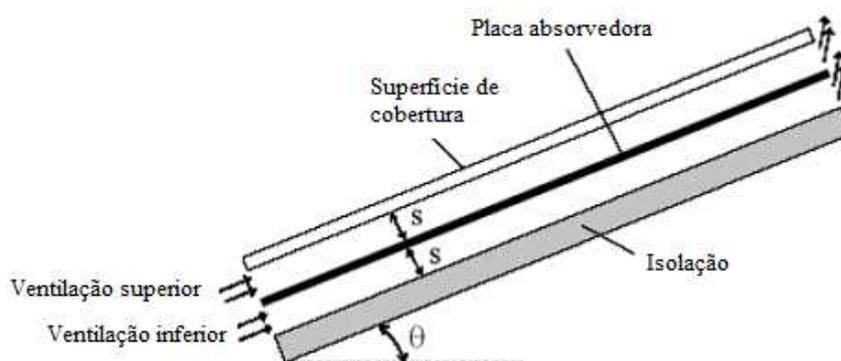


Figura 2.14 - Sistema de ventilação entre as placas para coletores.

Fonte: BURCH e JORGENSEN (2006)

O sistema de ventilação entre as placas para coletores consiste em deixar uma distância entre a superfície de cobertura e a placa absorvedora, bem como entre a placa absorvedora e a isolação. Dessa forma é possível que o ar externo circule entre a superfície, placa e isolação. Com isso limita-se a temperatura do absorvedor em até 100 °C. Se for

considerado um mecanismo de evaporação no processo, a temperatura poderia ser limitada em até 65 °C (BURCH e JORGENSEN, 2006).

Outro fato importante é que a integridade mecânica (incluindo a estabilidade dimensional) e a durabilidade ótica também devem ser mantidas ao longo de sua vida.

Em termos de eficiência do coletor, existe uma grande desvantagem associada à condutividade térmica dos polímeros como absorvedores solares. Os valores de condutividade térmica dos polímeros variam entre 0,1 a 0,5 W/mK. Já para os metais tradicionalmente utilizados como coletores, alumínio e cobre, esses valores estão na faixa de 200 a 380 W/mK. Pode-se melhorar a eficiência dos polímeros através do design (espessura de parede fina, maior superfície, etc.) ou usando materiais modificados (aditivos que aumentam a condutividade térmica), mas esta questão segundo Köhl et al. (2004) ainda é um desafio tecnologicamente difícil.

### 3 MODELO MATEMÁTICO DE COLETORES SOLARES PLANOS

As simulações computacionais podem gerar informações de alta confiabilidade em menor tempo e com custos inferiores aos protótipos físicos (DUFFIE e BECKMAN, 2006). Assim a simulação pode ser considerada uma ferramenta poderosa para uso em projetos de coletores solares para aquecimento de água.

Hottel e Woertz (1942), Hottel e Whillier (1955) e Bliss (1959) realizaram importantes estudos sobre o desempenho térmico de coletores solares planos e estabeleceram as relações de transferência de calor nesses equipamentos, que são utilizadas até hoje. Esta metodologia de cálculo, revista por Duffie e Beckman (2006), está descrita nos artigos referidos anteriormente. Koo (2010) desenvolveu uma ferramenta computacional baseada neste modelo utilizando o aplicativo EES. Silva (2012), baseado no trabalho de Koo (2010) e também utilizando o EES, introduziu algumas modificações no modelo, principalmente em relação aos materiais e geometrias dos coletores, obtendo resultados satisfatórios quando comparados com testes reais de coletores planos.

#### 3.1 MODELO DE HOTTEL-WHILLIER E BLISS

A avaliação do desempenho dos coletores é realizada através do cálculo da sua eficiência instantânea. Tal parâmetro é definido como a razão entre a taxa de calor útil recebida pelo fluido de trabalho e a irradiação solar global incidente no coletor, conforme mostrado na Eq. 3.1:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{A_C G_T} \quad (3.1)$$

onde  $\dot{Q}_u$  é a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho (taxa de calor útil),  $A_C$  a área do coletor e  $G_T$  é a irradiância solar global incidente na superfície do coletor.

A taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho pode ser determinada através de um balanço de energia no fluido, conforme Eq. 3.2:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c C_p (T_0 - T_i) \quad (3.2)$$

em que  $\dot{m}_c$  é a taxa de massa do fluido no coletor,  $C_p$  é o calor específico do fluido,  $T_o$  é a temperatura do fluido na saída do coletor e  $T_i$  a temperatura na entrada.

Por outro lado, a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho no coletor também pode ser determinada através de um balanço de energia, em regime permanente, aplicado ao coletor considerando como fluxo a energia absorvida pela placa absorvedora e as perdas para o ambiente, resultando, portanto na Eq. 3.3:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (3.3)$$

onde  $F_R$  é o fator de remoção de calor do coletor,  $S$  é a radiação absorvida pela placa por unidade de área,  $U_L$  é o coeficiente global de perdas térmicas e  $T_a$  a temperatura ambiente. O fator  $F_R$  é definido como a razão entre a taxa de energia transferida para o fluido sobre a taxa de energia que chega no coletor solar, equivalendo assim a efetividade de um trocador de calor convencional. Tal fator pode ser medido experimentalmente ou ser estimado analiticamente.

Entretanto, a taxa de energia absorvida pelo coletor pode ser calculada através da multiplicação da irradiação solar incidente na superfície do coletor pelo produto entre a transmissividade da cobertura e a absorvidade da placa absorvedora ( $\tau\alpha$ ). Ao ser assumido que esse produto seja uma propriedade única que engloba todas as suas interações, a radiação absorvida pela placa pode ser definida através da Eq. 3.4:

$$S = (\tau\alpha)G_T \quad (3.4)$$

Ao substituir a Eq. 3.3 na Eq. 3.4, obtêm-se a Eq. 3.5 para o cálculo da taxa de transferência de calor em função da irradiação incidente:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [(\tau\alpha)G_T - U_L (T_i - T_a)] \quad (3.5)$$

Logo, utilizando as Eq. 3.3 e 3.5, a eficiência instantânea do coletor, definida pela Eq. 3.1 pode ser determinada através das Eq. 3.6 ou 3.7:

$$\eta_i = \frac{\dot{m}_c C_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \quad (3.6)$$

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \quad (3.7)$$

As Eq. 3.6 e 3.7 estabelecem a base para a caracterização térmica dos coletores solares em testes padronizados. A partir delas é possível obter a curva característica de eficiência do coletor e os parâmetros  $F_R(\tau\alpha)$  e  $F_R U_L$ , os quais demonstram numericamente como a energia é absorvida e como a energia é perdida, respectivamente.

### 3.2 ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

O desempenho de um coletor solar requer o conhecimento da energia solar absorvida pela placa absorvedora. A radiação solar global incidente sobre uma superfície inclinada é constituída por três componentes: radiação direta incidente no coletor, radiação difusa e radiação refletida pelo solo, de acordo com a Eq. 3.8, considerando um modelo isotrópico

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \rho_g \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (3.8)$$

onde  $I_b$  é a irradiação direta horizontal,  $R_b$  é a razão entre a radiação direta incidente na superfície do coletor e a da superfície horizontal,  $I_d$  é a radiação difusa horizontal, os sub-índices  $b$ ,  $d$  e  $g$  representam, respectivamente, as componentes direta, difusa e refletida pelo solo. O parâmetro  $\beta$  representa a inclinação do coletor e  $\rho_g$  representa a refletividade do solo.

### 3.3 REFLEXÃO DA RADIAÇÃO

Em um meio transparente ou semitransparente, os ângulos de incidência e de reflexão da radiação não polarizada  $\theta_1$  e  $\theta_2$  entre um meio com índice de refração  $n_1$  (ar) e outro com índice de refração  $n_2$  (cobertura), são descritos na Fig. 3.1:

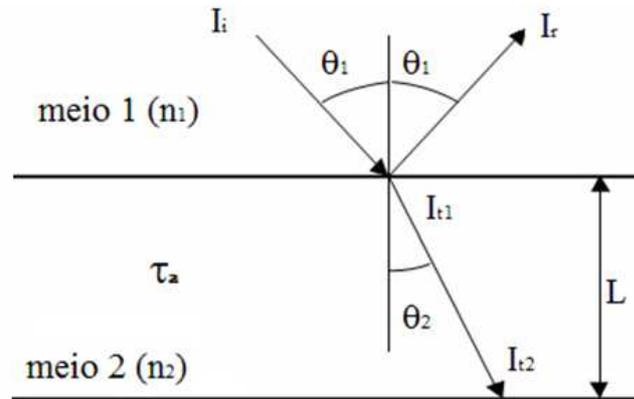


Figura 3.1 - Ângulo de incidência, reflexão e refração do meio.  
 Fonte: KOO (2010)

Conforme Duffie e Beckman (2006), para uma interface lisa as equações de Fresnel avaliam a reflexão da radiação não polarizada para a condição apresentada na Fig. 3.1, conforme a Eq. 3.9

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad (3.9)$$

em que  $r_{\parallel}$  e  $r_{\perp}$  são as componentes paralela e perpendicular da radiação, dadas pelas Eq. 3.10 e 3.11

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3.10)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3.11)$$

onde  $\theta_1$  e  $\theta_2$  estão relacionados com os índices de refração dados pela lei de Snell, Eq. 3.12

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (3.12)$$

Se o ângulo de incidência e os índices da refração do meio são conhecidos, a refletividade de uma superfície pode ser calculada usando as Eq. 3.9, 3.10 e 3.11.

### 3.4 ABSORÇÃO PELA COBERTURA

A Lei de Bouguer descreve a absorção da radiação em um meio parcialmente transparente com a suposição de que a radiação absorvida é proporcional à intensidade local e da distância que a radiação percorre no meio. Assim, a fração da radiação que é transmitida através do meio e absorvida por ele é dada pela Eq. 3.13

$$\tau_a = \frac{I_{t2}}{I_{t1}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_2}\right) \quad (3.13)$$

na qual  $K$  é o coeficiente de extinção e  $L$  a espessura do meio.

### 3.5 PROPRIEDADES ÓTICAS DOS SISTEMAS DE COBERTURA DOS COLETORES

A cobertura de um coletor solar é composta por uma placa ou filme de material transparente ou semitransparente, possuindo duas interfaces por cobertura que causam perdas por reflexão. Em um ângulo de incidência diferente da normal a essa cobertura, a radiação refletida em cada interface é diferente para cada componente da radiação, de maneira que a radiação transmitida e a refletida tornam-se parcialmente polarizadas.

Desprezando a absorção pelo material da cobertura e de acordo com o percurso realizado pela radiação no material, como mostrado na Fig. 3.2, pode-se calcular a transmissividade  $\tau$ , a refletividade  $\rho$ , e a absortividade  $\alpha$  de uma única cobertura para a radiação não polarizada como a média das componentes de polarização perpendicular e paralela, tal como descrito pela Eq. 3.14

$$\tau_c = \frac{1}{2}(\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}), \quad \rho_c = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}), \quad \alpha_c = \frac{1}{2}(\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel}) \quad (3.14)$$

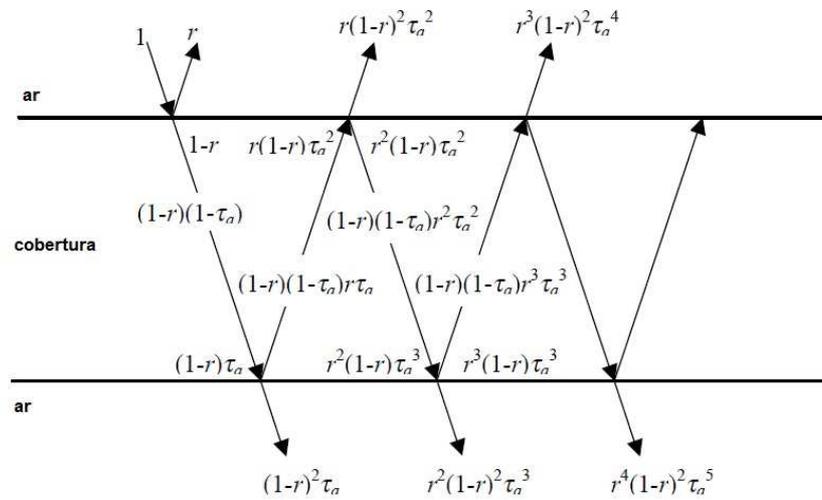


Figura 3.2 - Raio traçado da transmissividade e a refletividade na cobertura de um coletor solar.

Fonte: adaptado de KOO (2010)

As componentes perpendiculares e paralelas da polarização podem ser obtidas através do método de traçamento de raios, como descrito na Fig. 3.2. As componentes de polarização perpendiculares e paralelas são determinadas pelas Eq. 3.15 a 3.20:

$$\tau_{\perp} = \tau_a \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \left[ \frac{1 - r_{\perp}^2}{1 - (r_{\perp} \tau_a)^2} \right] \quad (3.15)$$

$$\rho_{\perp} = r_{\perp} (1 + \tau_a \tau_{\perp}) \quad (3.16)$$

$$\alpha_{\perp} = (1 - \tau_a) \left[ \frac{(1 - r_{\perp})}{1 - (r_{\perp} \tau_a)} \right] \quad (3.17)$$

$$\tau_{\parallel} = \tau_{\parallel} \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} \frac{(1 - r_{\parallel}^2)}{1 - (r_{\parallel} \tau_a)^2} \quad (3.18)$$

$$\rho_{\parallel} = r_{\parallel} (1 + \tau_a \tau_{\parallel}) \quad (3.19)$$

$$\alpha_{//} = (1 - \tau_a) \left[ \frac{(1 - r_{//})}{1 - (r_{//} \tau_a)} \right] \quad (3.20)$$

A transmissividade e a absortividade para um coletor de cobertura única podem ser simplificados e dados pelas Eq. 3.21 e 3.22

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (3.21)$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (3.22)$$

Assim, a refletividade de uma única cobertura pode ser obtida da Eq. 3.23

$$\rho = 1 - \alpha - \tau \quad (3.23)$$

Então

$$\rho \cong \tau_a (1 - \tau_r) = \tau_a - \tau \quad (3.24)$$

### 3.6 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA EQUIVALENTE PARA A RADIAÇÃO DIFUSA

No modelo do céu isotrópico, a radiação incidente em um coletor consiste da radiação proveniente da direção do Sol, da radiação solar difusa do céu e da radiação refletida pelo solo. Enquanto a análise anterior pode ser aplicada diretamente para a fração direta, a transmissividade do sistema de cobertura para a fração difusa e refletida pelo solo deve ser calculada integrando-se a transmissividade ao longo dos ângulos de incidência apropriados.

Esse cálculo pode ser simplificado usando-se a definição de ângulos equivalentes que fornecem a mesma transmissividade para essas duas frações, difusa e refletida pelo solo, conforme Duffie e Beckman (2006).

Assim, o ângulo de incidência equivalente para radiação difusa pode ser calculado pela Eq. 3.25

$$\theta_{d,e} = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad (3.25)$$

em que  $\beta$  é o ângulo de inclinação do coletor.

Para a radiação refletida pelo solo, o ângulo de incidência equivalente é dado pela Eq. 3.26

$$\theta_{g,e} = 90 - 0.5788\beta + 0.00269\beta^2 \quad (3.26)$$

### 3.7 PRODUTO TRANSMISSIVIDADE-ABSORTIVIDADE ( $\tau\alpha$ )

A radiação que passa através do sistema de cobertura é absorvida pela placa absorvedora enquanto que uma parcela desta radiação é refletida de volta para a cobertura, como ilustrado na Fig. 3.3. Como pode ser observada nessa mesma figura, a radiação emitida pela placa absorvedora não é totalmente perdida, uma vez que parte dela é refletida outra vez pela cobertura. Ao assumir que a radiação refletida pela placa absorvedora é difusa e não polarizada, as múltiplas reflexões continuam de forma que a fração da radiação incidente absorvida pela placa absorvedora pode ser representada pela Eq. 3.27

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (3.27)$$

onde  $\rho_d$  é a refletividade da cobertura para a radiação difusa emitida pela placa absorvedora e que pode ser estimada a partir da Eq. 3.24 utiliza um ângulo de incidência equivalente de  $60^\circ$ .

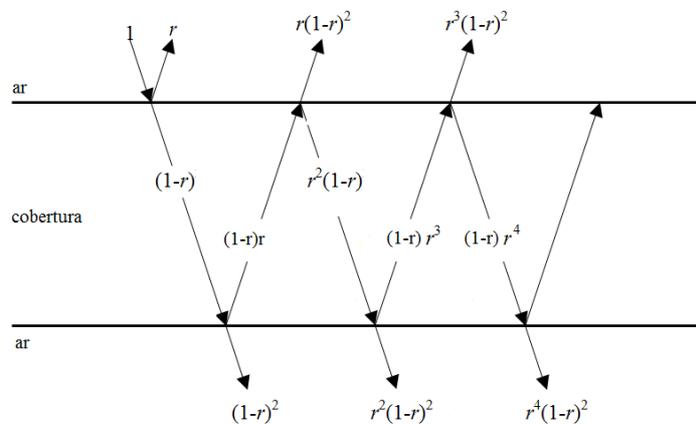


Figura 3.3 Radiação solar absorvida e refletida pela cobertura.

Fonte: adaptado de KOO (2010)

### 3.8 DEPENDÊNCIA ANGULAR DE $(\tau\alpha)$

A dependência angular do produto transmissividade-absortividade  $(\tau\alpha)$  pode ser calculada utilizando as Eq. 3.9 a 3.22 para as propriedades óticas da cobertura e as relações de dependência angular para a absorvidade da placa absorvedora. Na Fig. 3.4 é apresentada essa dependência angular em relação a uma condição de incidência normal, conforme mostrado em Duffie e Beckman (2006).

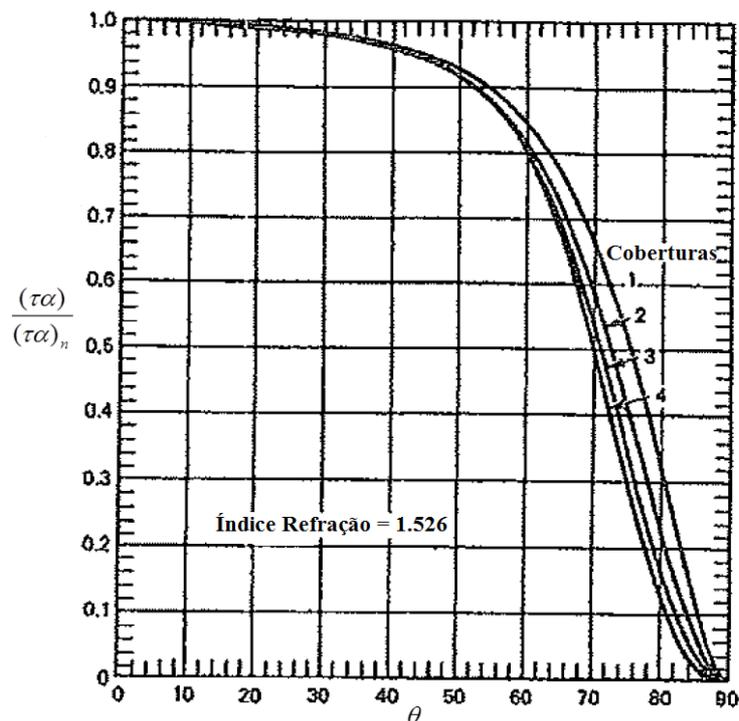


Figura 3.4 - Curva para uma ou quatro coberturas.  
 Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2006)

### 3.9 PERDAS DE CALOR NO COLETOR

As perdas de calor em um coletor solar térmico podem acontecer de várias formas: pela cobertura, pelas bordas laterais ou pelo fundo do coletor, sendo que para o estudo em questão as perdas mais importantes nos coletores poliméricos estão ligadas ao processo de transferência de calor através da cobertura.

Esta perda está intrinsecamente ligada ao fato de que a cobertura polimérica não possui as mesmas características do vidro, ou seja, não pode ser considerado opaco para radiações infravermelhas. Com isso, a radiação que é emitida pela placa absorvedora é enviada diretamente para o meio externo (céu), considerado neste caso como equivalente a

um corpo negro a uma dada temperatura. Para quantificar essas perdas, divide-se o processo em duas partes: perdas pela cobertura, devido aos processos de radiação e convecção e perdas pelo fundo e laterais, considerados aqui processos unicamente de condução (KOO, 2010).

### 3.9.1 Perdas térmicas pela cobertura

As perdas térmicas pela cobertura são obtidas a partir da consideração dos mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação entre placas paralelas e entre placa e o céu. Para essa análise, utiliza-se o método da radiação líquida, descrito em Siegel e Howell (1992) e mostrado na Fig. 3.5.

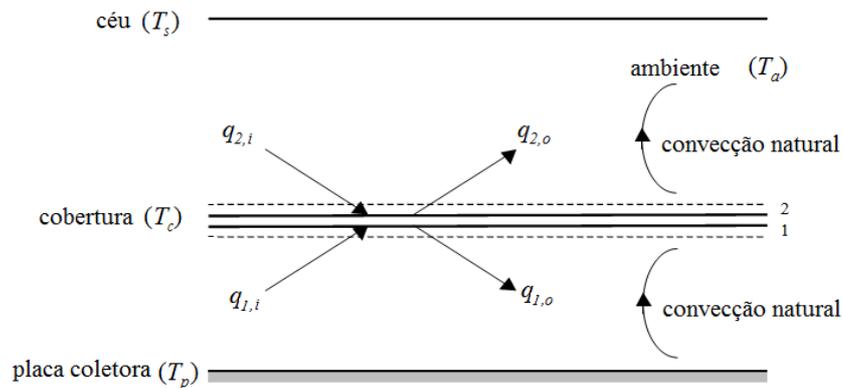


Figura 3.5 - Sistema com uma cobertura.

Fonte: adaptado de KOO (2010)

Para o caso específico de cobertura com material polimérico, utiliza-se a metodologia apresentada por Koo (2010). Pelo método da radiação líquida, o fluxo de radiação que sai da cobertura pode ser escrito em termos dos fluxos que chegam a ela, conforme descrito pelas Eq. 3.28 e 3.29

$$q_{1,o} = \tau_c q_{2,i} + \rho_c q_{1,i} + \varepsilon_c \sigma T_c^4 \quad (3.28)$$

$$q_{2,o} = \tau_c q_{1,i} + \rho_c q_{2,i} + \varepsilon_c \sigma T_c^4 \quad (3.29)$$

em que  $T_c$  é a temperatura da cobertura,  $\tau_c$ ,  $\rho_c$  e  $\varepsilon_c$  são a transmissividade, a refletividade e a emissividade da cobertura para a radiação infravermelha, respectivamente.

Os fluxos de entrada  $q_{1,i}$  e  $q_{2,i}$  são relacionados com os fluxos de saída  $q_{1,0}$  e  $q_{2,0}$  através das Eq. 3.30 e 3.31:

$$q_{1,i} = \rho_p q_{1,0} + \varepsilon_p \sigma T_{pm}^4 \quad (3.30)$$

$$q_{2,i} = \sigma T_s^4 \quad (3.31)$$

onde  $\rho_p$  e  $\varepsilon_p$  são a refletividade e emissividade da placa, respectivamente e  $T_s$  é a temperatura do céu e  $T_{pm}$  é a temperatura média da placa absorvedora. Ao aplicar o balanço de energia para o volume de controle em torno da cobertura, conforme mostrado na Fig. 3.5, e considerando o processo de transferência de calor por convecção natural entre a placa absorvedora e a cobertura e entre a cobertura e o meio externo, tem-se que

$$q_{1,i} - q_{1,0} + h_{c,p}(T_{pm} + T_c) = q_{2,0} - q_{2,i} + h_w(T_c - T_a) \quad (3.32)$$

onde  $h_{c,p}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural entre a placa absorvedora e a cobertura e  $h_w$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa da cobertura e o ar externo, devido ao efeito do vento.

Simultaneamente ao resolver as Eq. 3.25 a 3.29, os fluxos de calor são obtidos para dadas temperaturas da placa e do céu e para as propriedades óticas do sistema placa-cobertura encontrando-se a taxa de calor  $\dot{Q}_t$ , conforme a Eq. 3.33

$$\dot{Q}_t = A_p [q_{1,i} - q_{1,0} + h_{c,p}(T_{pm} - T_c)] \quad (3.33)$$

### 3.9.2 Transferência de Calor pelas Laterais e Fundo do Coletor

O fluxo de energia dissipada por condução pelas laterais e fundo do coletor pode ser minimizado através da utilização de isolamento térmico adequado, proporcionando uma resistência à transferência de calor.

O coeficiente global de transferência de calor pelo fundo do coletor,  $U_b$  está relacionado com a espessura do isolamento e é apresentado na Eq. 3.34

$$U_b = \left( \frac{k_b}{L_b} \right) \quad (3.34)$$

em que  $k_b$  é a condutividade térmica do isolamento e  $L_b$  sua espessura.

A taxa de calor perdido pelo fundo do coletor é o resultado da condução de calor pelo isolamento de fundo, calculada a partir da Eq. 3.35

$$Q_b = U_b A_c (T_{pm} - T_a) \quad (3.35)$$

na qual  $A_c$  é a área da placa coletora.

De maneira similar como ocorre com as perdas pelo fundo, as perdas no perímetro do coletor dependem da espessura do isolamento e podem ser calculadas considerando uma taxa de calor unidimensional, conforme a Eq. 3.36

$$Q_e = U_e A_e (T_{pm} - T_a) \quad (3.36)$$

onde  $U_e$  é o coeficiente global de transferência de calor pelas laterais e  $A_e$  é a área de contorno do coletor solar de placa plana, dado pela Eq. 3.37

$$U_e = \frac{(UA_e)_{laterais}}{A_c} = \frac{\left( \frac{k_b}{L_e} \right) p \cdot e}{A_c} \quad (3.37)$$

onde  $L_e$  é a espessura do contorno do coletor,  $p$  é o perímetro do coletor ( $2W + 2H$ ), e  $e$  representa a altura da placa absorvedora.

A taxa total de transferência de calor do coletor (perdas globais) é a soma das componentes  $Q_t$ ,  $Q_e$  e  $Q_b$  tal como mostrado na Eq. 3.38

$$Q_L = Q_t + Q_e + Q_b \quad (3.38)$$

A temperatura do céu  $T_s$  (temperatura absoluta) pode ser calculada utilizando a Eq. 3.39

$$T_s = T_a \left[ 0,711 + 0,0056T_{dp} + 0,000073T_{dp}^2 + 0,013\cos(15t) \right]^{1/4} \quad (3.39)$$

em que  $t$  é o horário angular e  $T_{dp}$  a temperatura de orvalho do ar em graus Celsius.

### 3.10 COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

A taxa de calor perdido pelo processo de convecção devido ao efeito do vento sobre a cobertura do coletor solar pode ser calculada através do coeficiente de convecção,  $h_w$ . Para determinar este coeficiente, se utilizou os três números adimensionais, Nusselt ( $Nu$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Prandtl ( $Pr$ ), definidos pelas Eq. 3.40 a 3.42, respectivamente:

$$Nu = \frac{h_w A_{pp}}{k_{ar}} \quad (3.40)$$

$$Re = \frac{V_{ar} A_{pp}}{\nu_{pp}} \quad (3.41)$$

$$Pr = \frac{\nu_{ar}}{\alpha_{ar}} \quad (3.42)$$

onde  $L_e$  é quatro vezes a área da placa dividida pelo seu perímetro,  $V$  a velocidade do ar,  $k$  a condutividade térmica do ar,  $\nu$  a sua viscosidade cinemática e  $\alpha_{ar}$  a difusividade térmica do ar.

O coeficiente de transferência de calor,  $h_w$ , pode ser calculado usando a correlação de Sparrow para o número de Nusselt, dada pela Eq. 3.43, válida para  $Re$  na faixa de  $2 \times 10^4$  a  $9 \times 10^4$  encontrando-se o coeficiente pela Eq. 3.40.

$$Nu = 0,86 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.43)$$

### 3.11 CONVECÇÃO NATURAL ENTRE A COBERTURA E PLACA ABSORVEDORA

A taxa de transferência de calor por convecção natural entre duas placas paralelas, a placa absorvedora e a cobertura, está diretamente relacionada ao ângulo de inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, ou seja, quanto maior o ângulo, menor será a taxa de transferência de calor. Para essa situação, o número de Nusselt e o número de Rayleigh são dados pelas Eq. 3.44 e 3.45, respectivamente:

$$Nu = \frac{h_{c,p} L_{c,p}}{k_{ar}} \quad (3.44)$$

$$Ra = \frac{g \beta_{ar} \Delta T_{c,p} L_{c,p}^3}{\nu_{ar} \alpha_{ar}} \quad (3.45)$$

onde  $h_{c,p}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre as placas,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\beta_{ar}$  é o coeficiente de expansão volumétrica do ar e  $\Delta T_{c,p}$  a diferença de temperatura entre as placas.

Hollands et al. (1976) utilizaram para o cálculo do coeficiente de transferência de calor, para cobertura em vidro, uma correlação entre o número de Nusselt e o de Rayleigh para inclinações angulares do coletor solar entre 0 e 75°, dada pela Eq. 3.46. O expoente + nessa equação significa que apenas valores positivos dos termos entre colchetes são utilizados.

$$Nu = 1 + 1,44 \left[ 1 - \frac{1708 [\sin(1,8\beta)]^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (3.46)$$

Nos casos em que as coberturas são construídas em material polimérico, YIQIN et al. (1991) propõem uma adequação do modelo anterior, de acordo com a Eq. 3.47:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[ 1 - \frac{1296 [\sin(1,8\beta)]^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1296}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (3.47)$$

### 3.12 TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE PLACA ABSORVEDORA E FLUIDO DE TRABALHO

A taxa de transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho é geralmente referida como taxa de calor útil e é calculada a partir da Eq. 3.3. A máxima taxa de transferência de calor no coletor solar ocorre quando toda a superfície do coletor encontra-se na temperatura de entrada do fluido de trabalho, condição na qual as perdas para o meio são mínimas.

A radiação no coletor, a temperatura ambiente e a velocidade do vento também são necessárias. São avaliados dois tipos de informações: dados térmicos de saída e rendimento. Esses dados permitem a caracterização do coletor que indicam como o coletor absorve energia e como ele perde para o meio.

Se  $F_R$  e  $U_L$  não variam de forma considerável,  $F_R (\tau\alpha)$  e  $F_R U_L$  são dois parâmetros que descrevem como o coletor se comporta, onde  $F_R (\tau\alpha)$  indica como a energia é absorvida e  $F_R U_L$  indica como a energia é dissipada.

A Eq. 3.48 descreve o rendimento térmico de um coletor operando sob condição de estabilização, pode ser escrito em termos de irradiância incidente:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] = A_c F_R [G_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (3.48)$$

Como essa condição é variável, a máxima taxa de calor útil é corrigida pela variável  $F_R$ , fator de remoção de calor do coletor, relaciona a taxa de energia útil real de um coletor pela taxa de energia na condição de que toda a superfície do coletor estivesse na temperatura de entrada do fluido, que representa a condição de máxima transferência de calor, dado pela Eq. 3.48

$$F_R = \frac{\dot{m}_c C_p (T_o - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (3.48)$$

Esse parâmetro é equivalente à efetividade de um trocador de calor convencional. O fator de remoção de calor pode ser calculado utilizando-se a Eq. 3.50

$$F_R = \frac{\dot{m}_c C_p}{A_c U_L F'} \left[ 1 - \exp\left( \frac{A_c U_L F'}{\dot{m}_c C_p} \right) \right] \quad (3.50)$$

onde  $F'$  é chamado de fator eficiência do coletor solar. Este fator representa fisicamente, para uma posição específica, a relação entre o ganho de energia útil real e o ganho de energia útil se toda a placa absorvedora estivesse na temperatura local do fluido. Esse fator  $F'$  pode ser calculado conforme a Eq. 3.51 e está relacionado com a geometria da placa absorvedora

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{f,i}} \right]} \quad (3.51)$$

onde  $W$  é a distância entre os centros dos tubos,  $D$  é o diâmetro externo dos tubos,  $C_b$  é a condutância térmica de contato (solda) entre a placa absorvedora e o tubo,  $D_i$  é o diâmetro interno dos tubos e  $h_{f,i}$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo para o escoamento interno. Os parâmetros geométricos do coletor aparecem representados na Fig. 3.5 para o caso de um coletor convencional de placa absorvedora-tubos circulares.  $F$  é a eficiência da aleta, uma vez que, como se observa na Fig. 3.6, a placa absorvedora entre os tubos pode ser considerada como tal.

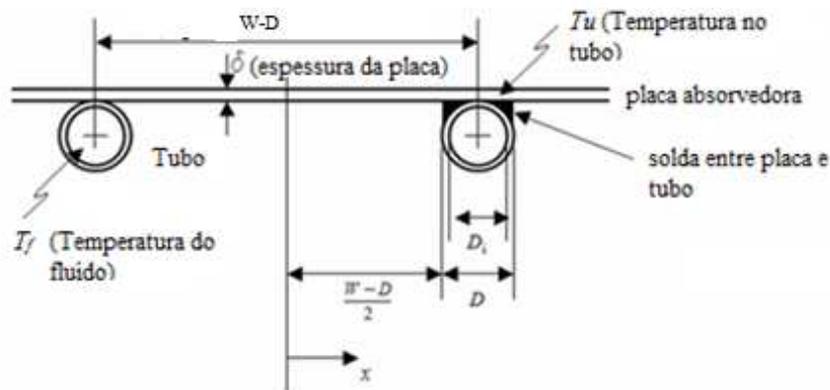


Figura 3.6 - Configuração geométrica entre placa coletora e tubo.  
Fonte: Adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2006)

Para a determinação da eficiência da aleta, considera-se momentaneamente que o gradiente de temperatura na direção do fluxo seja desprezível. Desta forma, a eficiência da aleta pode ser obtida pela Eq. 3.52:

$$F = \frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2} \quad (3.52)$$

O termo  $m$  é um parâmetro de arranjo da aleta, definido pela Eq. (3.53):

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k_p \delta}} \quad (3.53)$$

em que  $k_p$  é a condutividade térmica do material da placa absorvedora e  $\delta$  a sua espessura e  $U_L$  é o coeficiente global de perdas térmicas.

Como pode ser observado nas Eq. 3.52 e 3.53, a eficiência da aleta sofre significativa influência da condutividade do material utilizado como superfície absorvedora e de sua espessura. No caso do uso de materiais poliméricos para a construção da placa absorvedora utilizando geometrias similares às dos coletores metálicos convencionais, a diminuição de desempenho do coletor solar reduz-se significativamente. Esse efeito decorre principalmente em função das baixas condutividades térmicas do material polimérico, conforme mostrado na Tab. 2.1, que é aproximadamente 1000 vezes menor que a do cobre e cerca de 600 vezes menor que a do alumínio.

Uma forma de minimizar esse efeito é mudar a geometria da placa absorvedora, aumentando o número de canais de escoamento para diminuir o efeito de aleta entre eles. A geometria proposta nesse trabalho é apresentada na Fig. 3.7 na qual a seção dos canais de escoamento passa a ser retangular, em função da característica do processo de fabricação utilizado e a conexão entre os canais possui um comprimento mínimo (aleta), visando apenas possibilitar a solda entre a placa superior e inferior para aumentar a rigidez mecânica do conjunto.

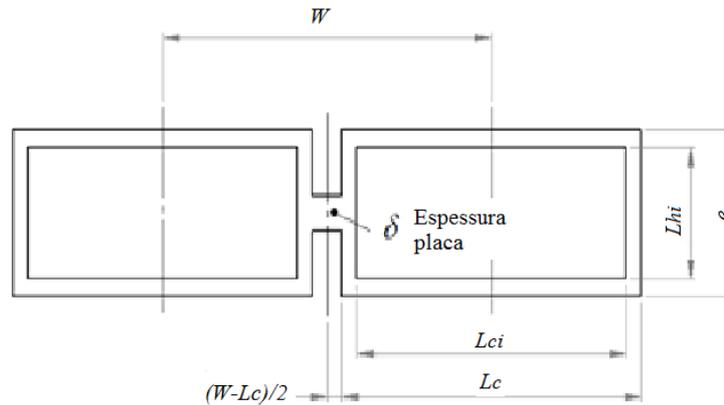


Figura 3.7 - Configuração geométrica entre placa coletora e tubo retangular

Na Fig. 3.7,  $L_{hi}$  é a altura interna do canal,  $L_c$  a largura externa e  $L_{ci}$  a largura interna. Quando a geometria do coletor é alterada, como nesse caso, o fator de eficiência do coletor  $F'$  é calculado alterando alguns parâmetros em sua equação básica (Eq.3.51), conforme a descrição da Fig. 3.6. Assim, reescrevendo a Eq. 3.52, a eficiência da aleta é dada pela Eq. 3.54

$$F_x = \frac{\tanh[m(W - L_c)/2]}{m(W - L_c)/2} \quad (3.54)$$

e o fator de eficiência do coletor,  $F'$ , é reescrito pela Eq. 3.55

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[ \frac{1}{U_L [L_c + (W - L_c)] F_x} + \frac{1}{D_h h_{fi}} \right]} \quad (3.55)$$

onde  $D_h$  é o diâmetro hidráulico do canal de escoamento.

Antes de determinar as propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho é necessária a definição de sua temperatura média,  $T_{f,m}$ , que pode ser calculada pela Eq. 3.56

$$T_{f,m} = T_e + \left[ \frac{Q_u / A_p}{U_L F_R} \right] (1 - F'') \quad (3.56)$$

onde  $F''$  é o fator de fluxo do coletor, definido como a razão entre  $F_R$  e  $F'$ , dado pela Eq. 3.57

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m}_c C_p}{A_p U'_L F'} \left[ 1 - \exp\left( \frac{A_p U'_L F'}{\dot{m}_c C_p} \right) \right] \quad (3.57)$$

A temperatura média da placa,  $T_{p,m}$ , será maior do que a temperatura média do fluido, devido às resistências térmicas entre a placa absorvedora e o fluido.

A taxa de transferência de calor entre a placa absorvedora e o fluido de trabalho, considerando a temperatura média da placa, pode ser calculada a partir da Eq. 3.3 substituindo  $T_i$  por  $T_{p,m}$ , como na Eq. 3.58

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [S - U_L (T_{p,m} - T_a)] \quad (3.58)$$

Igualando-se essa última equação com a Eq. 3.56, obtém-se a temperatura média da placa, conforme a Eq. 3.59

$$T_{p,m} = T_i + \left[ \frac{\dot{Q}_u / A_c}{U_L F_R} \right] (1 - F_R) \quad (3.59)$$

### 3.13 CONVECÇÃO FORÇADA PARA O ESCOAMENTO INTERNO NOS TUBOS

Para escoamento totalmente desenvolvido dentro dos tubos e número de Reynolds entre 3.000 a  $5 \times 10^6$ , o número de Nusselt turbulento pode ser obtido através da correlação de Gnielinsky, (1976) dada pela Eq. 3.60

$$Nu_{turb} = \left( \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1 + 12,7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)} \right) \quad (3.60)$$

onde  $f$  é o fator de atrito de Darcy para tubos lisos e é calculado através da relação de Petukhov (1970):

$$f = (0,079 \ln Re - 1,64)^{-2} \quad (3.61)$$

Para tubos curtos com entradas caracterizadas por cantos vivos, o desenvolvimento térmico e hidrodinâmico nas bordas resultam em um incremento significativo no coeficiente de transferência de calor próximo à entrada. Com a finalidade de realizar uma correção nesse processo Duffie e Beckman (2006), sugerem a correlação de McAdams (1954) a qual é expressa pela Eq. 3.62

$$Nu = Nu_{urb} \left[ 1 + \left( \frac{D_i}{L_1} \right)^{0,7} \right] \quad (3.62)$$

em que  $L_1$  representa o comprimento do tubo.

Nos casos em que ocorre fluxo em escoamento laminar no interior dos tubos, o número de Nusselt é dado pela Eq. 3.63:

$$Nu = 4,4 + \left[ \left( \frac{0,00172 (\text{Re Pr } D_i / L_1)^{1,66}}{1 + 0,00281 (\text{Re Pr } D_i / L_1)^{1,29}} \right) \right] \quad (3.63)$$

Conforme Duffie e Beckman (2006), no caso de escoamento em regime laminar completamente desenvolvido no interior dos tubos o fator de atrito  $f$  é dado pela Eq. 3.64

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.64)$$

### 3.14 PERDAS DE CARGA NO COLETOR

A determinação da perda de carga no coletor solar é um item importante durante o projeto de uma determinada geometria, uma vez que interfere no processo de escoamento e, portanto, na eficiência do coletor.

Sabe-se que a perda de carga está relacionada com a tubulação utilizada, ou seja, diâmetro, comprimento e conexões, podendo ser dividida em perdas distribuídas e localizadas.

A perda de carga distribuída ocorre ao longo da tubulação e é expressa pela Eq. 3.65

$$\Delta P_1 = \frac{\rho_l f L_l u^2}{2 D_h} \quad (3.65)$$

em que  $\rho_l$  é a massa específica do fluido de trabalho,  $f$  é o fator de atrito e para escoamento completamente desenvolvido pode ser dado pelas Eq. 3.61 ou Eq. 3.64, dependendo do regime de escoamento, turbulento ou laminar respectivamente,  $L_l$  o comprimento da tubulação e  $u$  a velocidade média do fluido dentro da tubulação.

Como a configuração convencional de um coletor solar é a de tubos paralelos conectados a dois cabeçotes, um em cada extremidade é provocado perdas de carga localizadas na entrada e saída dos tubos, que podem ser expressas pela Eq. 3.66

$$\Delta P_2 = \frac{\rho_l K_{\text{pressão}} u^2}{2} \quad (3.66)$$

em que  $K_{\text{pressão}}$  é o coeficiente de perda de carga localizada.

Ao serem consideradas as perdas de carga na entrada e na saída do coletor, a perda de carga total  $\Delta P_{\text{total}}$  é dada pela Eq. 3.67:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (3.67)$$

### 3.15 TEMPERATURA DE ESTAGNAÇÃO DO COLETOR

Para que não ocorram danos irreversíveis à estrutura dos coletores solares construídos com materiais poliméricos, as temperaturas de estagnação devem ficar abaixo do índice térmico relativo *RTI*.

A temperatura de estagnação,  $T_{\text{máx}}$ , é a temperatura mais alta que pode atingir um coletor solar. Isso acontece quando o coletor não estiver em funcionamento, ou seja, quando o fluido de trabalho não circular. Neste caso, a taxa de calor útil será nula e o balanço de energia no coletor será dado pela Eq. 3.68:

$$S = U_L (T_{p,m} - T_a) \quad (3.68)$$

Assim, a temperatura de estagnação pode ser calculada de acordo com a Eq. 3.69:

$$T_{\max} = T_a + \frac{S}{U_L} \quad (3.69)$$

### 3.16 TESTE DE COLETORES SOLARES PLANOS

Os testes de desempenho de coletores solares térmicos fornecem os parâmetros do coletor que são necessários para a estimativa do desempenho em longo prazo dos sistemas solares térmicos.

A norma utilizada no Brasil e seguida nesse trabalho para a determinação do desempenho térmico de coletores solares planos é a ABNT NBR 15747-2 (2009). A metodologia estabelecida nessa norma pode ser utilizada tanto para absorvedores construídos com materiais orgânicos como inorgânicos. Os materiais orgânicos compreendem o grupo dos plásticos e elastômeros, enquanto os inorgânicos compreendem os materiais metálicos em geral. A norma também permite os ensaios de desempenho em coletores com ou sem cobertura.

Os testes de desempenho são divididos em regime permanente e regime quase-dinâmico. Os testes em regime permanente podem ser feitos em bancadas externas (*outdoor*) ou internas (*indoor*), sob condições completamente controladas, em uma condição de operação chamada de quase-permanente, onde são admitidas pequenas variações nos parâmetros de teste, como por exemplo, radiação solar incidente no coletor, vazão do fluido de trabalho, temperatura de entrada no coletor, velocidade do vento e ângulo de incidência.

O método de teste quase-dinâmico, documentado na mesma norma, é aplicável para coletores com ou sem cobertura, que operam com fluido de transferência de calor líquido. O método é baseado no teste externo em condições quase-dinâmicas, usando uma dependência de segunda ordem da eficiência do coletor com a diferença de temperatura.

A maior diferença entre os dois testes é que no quase-dinâmico, o ganho de energia útil do coletor é medido em um pequeno intervalo de tempo, entre 5 a 10 min, enquanto a irradiância solar e a temperatura ambiente podem variar. Todos os demais parâmetros de operação são controlados dentro da faixa especificada.

Neste trabalho será aplicado o método de ensaio em regime permanente, com algumas concessões, em função do tipo de montagem realizada para a obtenção dos dados e dos equipamentos disponíveis.

### 3.16 CONDIÇÕES E PROCEDIMENTOS PARA TESTE

Para a montagem do coletor deve ser utilizada uma estrutura aberta permitindo que o ar circule livremente ao redor do coletor solar e que sua borda inferior não esteja a menos de 0,5 m da superfície do solo ou da laje. Correntes de ar passando pelas paredes do edifício e que podem aquecer o ar nas proximidades do coletor devem ser evitadas assim como sua localização deve estar afastada, pelo menos 2 m, das bordas de telhados.

As faixas especificadas para os parâmetros climáticos e do coletor durante os ensaios são mostradas na Tab. 3.1.

Tabela 3.1. Desvios permitidos durante os ensaios em regime permanente

Condições de teste	
Ângulo de incidência da radiação direta $\theta$ , (°)	< 20
Irradiância solar global, $G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	> 700
Irradiação solar difusa, %	< 30
Variação da irradiação solar, $G_T$ (W/m <sup>2</sup> )	< 50
Velocidade do ar, $V_{ar}$ (m/s)	1 a 4
Taxa de massa, $\dot{m}_c$ (kg/s)	0,02 ± 1%
Variação da temperatura de entrada, $\Delta T_i$ (K)	± 0,1
Variação da temperatura ambiente, $\Delta T_a$ (K)	± 1

Fonte: ABNT NBR 15747-2

Os transdutores utilizados para medição dos parâmetros de operação devem possuir incertezas definidas pela norma, conforme se especifica na Tab. 3.2.

Tabela 3.2. Incertezas dos dispositivos de medição utilizados

Dispositivo	Incerteza
Piranômetro	Classe I
Temperaturas, (K)	$\leq 0,1$
Diferencial de temperatura, $\Delta$ (K)	$\leq 0,05$
Temperatura do ar ambiente, $T_a$ (K)	$< 0,5$
Velocidade do ar, $V_{ar}$ (m/s)	$< 0,5$
Taxa de massa, $\dot{m}_c$ (kg/s)	$\pm 1\%$
Registradores analógicos/digitais (fundo de escala)	$< 0,5\%$

Fonte: ABNT NBR 15747-2

O coletor solar deverá ser pré-condicionado antes dos ensaios, através de sua exposição ao tempo, vazio, durante 5 h com irradiância solar global maior que  $700 \text{ W/m}^2$ . O coletor deverá ser ensaiado sobre seu intervalo de temperaturas de operação, em condições de céu claro. Devem ser utilizadas ao menos quatro temperaturas de entrada, espaçadas sob o intervalo de temperatura do coletor. A primeira temperatura do fluido de entrada deverá estar com uma temperatura  $T_m \pm 3 \text{ K}$  da temperatura ambiente, visando uma boa precisão para obtenção do ponto de máxima eficiência. Devem ser medidos pelo menos quatro pontos de dados independentes para cada temperatura de entrada. Caso seja possível, deveriam ser tomados pontos antes e depois do meio-dia, para cada temperatura de entrada do fluido.

A potência útil instantânea do coletor é calculada pela Eq. 3.2 e a eficiência instantânea do coletor é calculada pela Eq. 3.1.

A representação da curva de desempenho (eficiência) do coletor é realizada em relação à temperatura reduzida, conforme a Eq. 3.72:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G_T} \quad (3.72)$$

onde  $T_m$  é a temperatura média do fluido de transferência de calor, definida pela Eq. 3.73:

$$T_m = T_i + \frac{T_o - T_i}{2} \quad (3.73)$$

A representação esquemática da bancada utilizada para a realização dos ensaios está mostrada na Fig. 3.8 e cada um dos dispositivos de medida são enumerados na Tab. 3.3.

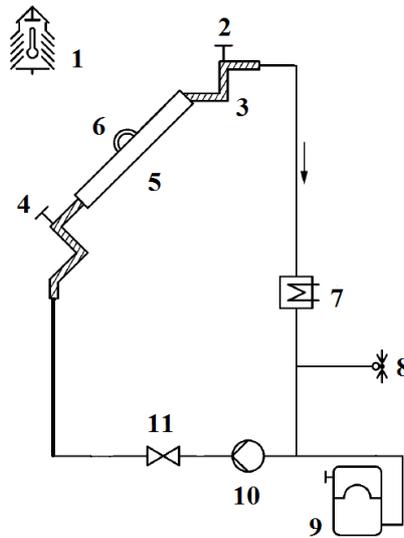


Figura 3.8 - Exemplo de circuito fechado para ensaios de coletores.  
 Fonte: ABNT NBR 15747-2

Tabela 3.3: Descrição dos equipamentos para teste de coletores conforme a norma  
 ABNT NBR 15747-2.

Localização	Descrição
1	Sensor de temperatura de ar ambiente
2	Sensor de temperatura ( $T_o$ )
3	Tubulação
4	Sensor temperatura ( $T_i$ )
5	Coletor solar
6	Piranômetro
7	Resistência elétrica
8	Manômetro
9	Reservatório
10	Bomba
11	Válvula reguladora de vazão

## 4 PROCESSAMENTO DE POLÍMEROS

Uma grande variedade de técnicas de processamento é empregada na obtenção de artefatos poliméricos. Segundo Köhl et al. (2012), o método usado de conformação para um determinado polímero depende de vários fatores, tais como:

1. Se o polímero é termoplástico ou termofixo;
2. Geometria e tamanho da peça;
3. Para polímeros termoplásticos:
  - Temperatura que amolece;
  - Propriedades reológicas (curvas de fluxo) quando amolecido;
  - Temperatura;
  - Tempo de resfriamento após a moldagem.
4. Para polímeros termofixos:
  - Temperatura;
  - Tempo de cura.

O processamento de polímeros termoplásticos ocorre normalmente em temperaturas elevadas, entre 200 até 500 °C e, com frequência, com a aplicação de pressão. Os termoplásticos amorfos são conformados acima das suas temperaturas de transição vítrea, enquanto que os semicristalinos são processados acima de suas temperaturas de fusão.

Para Köhl et al. (2012), um fator importante que deve ser destacado no processamento de polímeros é que estes materiais geralmente apresentam um calor específico e calor latente maiores do que os materiais convencionais, tais como metais e cerâmicas. Por exemplo, o calor específico do cobre (0,09 kJ/kg °C) é bem inferior ao calor específico do poliestireno (PS) (1,34 kJ/kg °C). Portanto, os equipamentos de processamento de polímeros devem ser projetados de forma a atender aos requisitos necessários para que o material seja conformado adequadamente, isto é, deve-se levar em consideração o calor específico, o calor latente e as propriedades reológicas do polímero.

A Tab. 4.1 apresenta o calor específico, o calor latente de fusão, a temperatura de processamento e o calor específico de alguns polímeros.

Tabela 4.1: Calor específico, calor latente de fusão e propriedades de processamento para alguns polímeros.

Polímero	Cp (kJ/kg °C)	Calor latente (kJ/kg)	Temperatura de Processamento (°C)	Calor total para o processo (kJ/kg)
PMMA	1,47	-	225	300
HDPE	2,30	209	240	720
PP	1,93	100	250	550
PS	1,34	-	200	240
Náilon	1,67	130	280	570
PC	1,26	-	300	350
ABS	1,47	-	225	300
PPO	1,34	-	310	390

Fonte: adaptado de KÖHL et al. (2012)

Observa-se que os termoplásticos semicristalinos requerem maior quantidade de energia para serem fundidos. Para estes materiais, a aplicação de pressão, durante seu processamento, deve ser mantida à medida que a peça é resfriada, a fim de que o material conformado mantenha a sua forma desejada.

O processamento de polímeros termofixos é realizado normalmente em dois estágios. Em uma primeira etapa, o polímero de baixo peso molecular (algumas vezes chamado de pré-polímero) é preparado. Esse material é convertido no produto final, durante o segundo estágio, que é realizado normalmente dentro de um molde que possui a forma desejada. Este estágio, que é chamado de cura, pode ocorrer através do aquecimento ou adição de catalisadores e frequentemente é realizado sob pressão. A cura é uma reação química na qual se forma uma estrutura com ligações cruzadas ou em rede. Após essa reação o polímero termofixo é removido do molde, ainda quente, uma vez que após a formação do reticulado ele está dimensionalmente estável (KÖHL et al., 2012).

#### 4.1 PROCESSAMENTO DE TERMOPLÁSTICOS POR EXTRUSÃO

Esse processo permite a obtenção de produtos com comprimentos ilimitados e seção transversal constante, obrigando o material a passar através de um cabeçote sob condições de pressão e temperatura controladas. Desta maneira, a moldagem por extrusão apresenta

característica especial, que a distingue de todos outros processos de conformação de polímeros. Esse processo é contínuo e por isso é usado para fabricação de produtos acabados, como por exemplo: barras, fitas, mangueiras e tubos, como também para produtos semimanufaturados, que devam posteriormente sofrer novo processamento. A extrusão também é usada para incorporação de aditivos e, em alguns casos, pode ser usada como reatores de modificação de polímeros, também conhecida como extrusão reativa (OSWALD, 1994).

O processo de extrusão é realizado em um equipamento conhecido como extrusora. Existem extrusoras com uma única rosca e extrusoras de dupla rosca.

A Fig. 4.1 representa uma vista em corte de uma extrusora de uma rosca, ela é utilizada para o processamento de polímeros e consiste essencialmente de um cilindro em cujo interior gira um parafuso (rosca). O polímero, na forma de grãos ou em pó, é alimentado através do funil de alimentação para o canhão ou cilindro que está aquecido. O movimento da rosca promove o transporte do polímero, levando-o até a matriz. Durante este deslocamento, o material é progressivamente aquecido, plastificado, homogeneizado, comprimido e finalmente é forçado a sair através do orifício da matriz. À medida que o polímero flui através da matriz, o material adquire a forma da seção transversal. Desta maneira, quando o polímero deixa a matriz, a sua forma corresponderá aproximadamente à seção transversal desta (OSWALD, 1994).

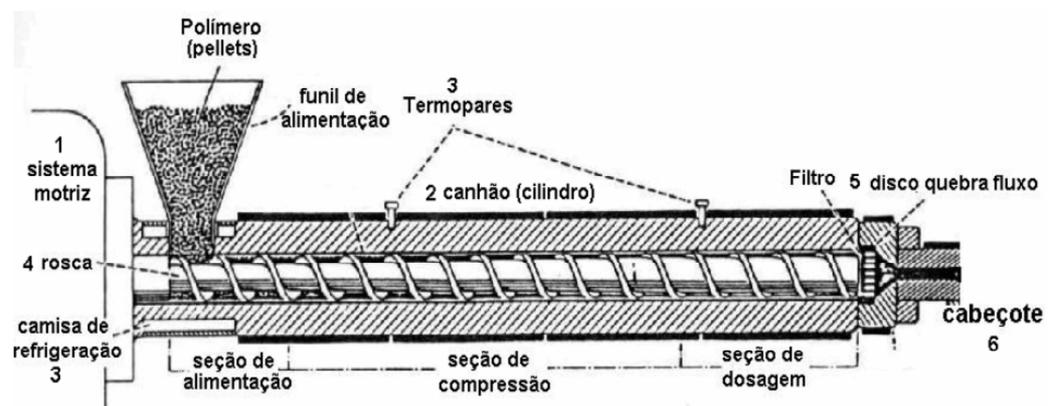


Figura 4.1 - Detalhe de uma extrusora de rosca utilizada para o processamento de materiais poliméricos

Fonte: OSWALD (1994)

#### 4.1.1 Processamento de Termoplásticos por Injeção

Esse processo consiste basicamente em forçar o polímero amolecido ou fundido através de uma rosca - pistão para o interior da cavidade de um molde. Após o resfriamento, a peça é então extraída. A moldagem por injeção é um processo intermitente composto por várias etapas que se repetem a cada ciclo, na qual podem ser produzidas uma ou várias peças por vez. Vários produtos podem ser fabricados através do processo de injeção, tais como: brinquedos, discos, telefones, gabinetes de computadores, televisores, capacetes, para-choques, dentre outros. Este processo pode ser usado tanto para termoplásticos, elastômeros como termofixos (KÖHL et al., 2012).

O ciclo de injeção começa a partir da adição de material polimérico no funil de alimentação. O polímero passa do funil de alimentação para o cilindro que é aquecido, através de resistências elétricas. O material amolecido é empurrado (injetado) pelo êmbolo contra as paredes da cavidade do molde que deve estar fechado. O molde permanece fechado até que ocorra o resfriamento adequado do polímero. Após seu resfriamento a peça é então extraída. A Fig. 4.2 ilustra uma máquina de injeção com pistão (KÖHL et al., 2012):

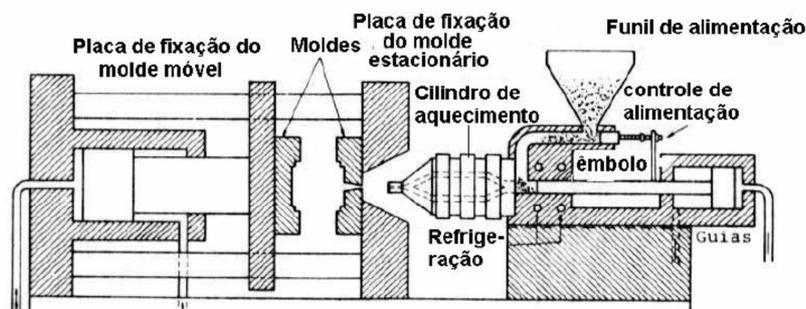


Figura 4.2 - Máquina de injeção de pistão

Fonte: KÖHL et al. (2012)

As condições de processamento influenciam diretamente a estrutura do material, como por exemplo: orientação molecular, grau de cristalinidade, distribuição e forma dos cristais e tensões. A estrutura do material, por sua vez, irá influenciar as propriedades finais do produto, tais como: propriedades mecânicas, óticas, elétricas e acabamento superficial, além do surgimento de defeitos, como rechupes, empenamentos, bolhas e outros. Desta maneira, o controle das condições de processamento é que irá garantir a qualidade e a reprodutibilidade das propriedades finais da peça (KÖHL et al., 2012).

#### 4.1.2 Processamento de Termoplásticos: Moldagem por sopro

Termoplásticos podem ser moldados pelo processo de sopro na forma de uma infinidade de produtos ocos, tais como garrafas e frascos de embalagens. O processo consiste basicamente na expansão de uma pré-forma aquecida, por meio ar comprimido e forçando-a assumir o formato do molde. Uma vez resfriado o produto é extraído do molde e tem início um novo ciclo de moldagem (KÖHL et al., 2012).

#### 4.1.3 Processamento de Termoplásticos por Termoformagem

A termoformagem é um modo de moldar lâminas dando forma ao contorno através da utilização de calor e pressão tanto positivas como a vácuo. As etapas do processo são ilustradas na Fig. 4.3:

1. Fixação da lâmina;
2. Aquecimento;
3. Moldagem a vácuo;
4. Extração.

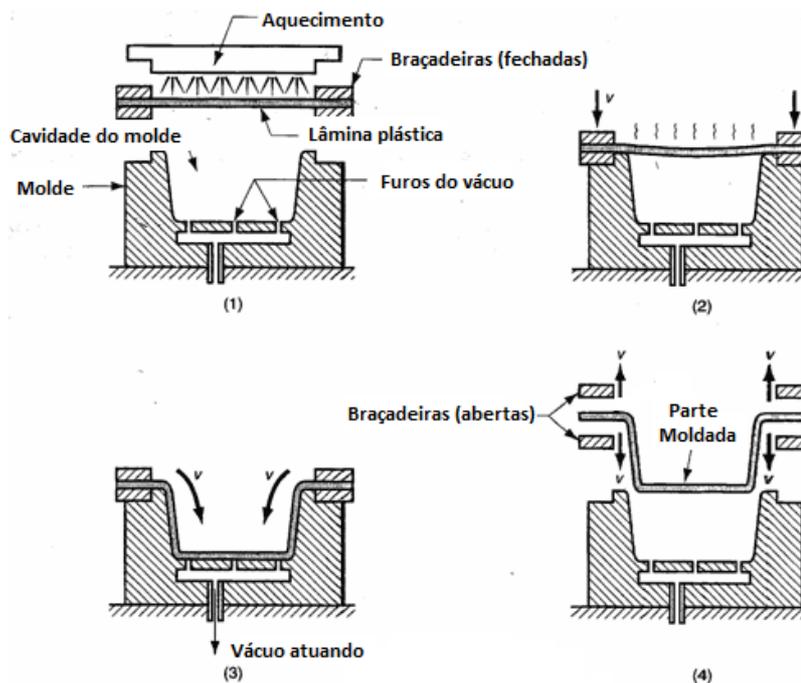


Figura 4.3 - Etapas de termoformagem

Fonte: KÖHL et al. (2012)

Na termoformagem, uma lâmina plástica seca é aquecida a uma temperatura pré-determinada na qual o material plástico amolece, mas a uma temperatura inferior à temperatura de fusão. A placa é esticada para cobrir o contorno do molde, normalmente utilizando vácuo e logo é refrigerada na temperatura na qual o termoplástico passa a ser rígido, retendo assim a forma do molde.

A peça termoformada pode ser cortada para eliminar bordas desnecessárias, decorada e/ou convertida em artigos para diferentes aplicações. Cada etapa do processo de termoformagem é vital na determinação da qualidade do produto final. Devem ser monitorados tanto na qualidade da lâmina utilizada, quanto os parâmetros de aquecimento, moldagem e esfriamento, para obtenção de peças de alta qualidade. A qualidade será dada pela uniformidade na espessura da parede, a aparência superficial, cor e aceitáveis propriedades físicas na aplicação final (KÖHL et al., 2012).

A termoformagem pode atingir uma ampla gama de espessuras desde as medidas finas utilizadas em contêineres de alimentos ou até em lâminas mais grossas utilizadas na fabricação de interiores de geladeiras. O tamanho, desenho e o tipo de peça determinam a técnica de termoformagem e o equipamento a ser utilizado. Entre os fatores que devem ser considerados na escolha de um processo de termoformagem estão:

1. Custo (inicial e manutenção);
2. Tamanho (tamanho da peça e a capacidade da máquina);
3. Versatilidade;
4. Tipo de aquecimento e esfriamento;
5. Facilidade de mudanças de moldes;
6. Construção de moldes.

Entre as vantagens do uso da termoformagem estão: menor custo de equipamento, possibilidade de menores espessuras de parede, capacidade de moldar peças de grandes superfícies, possibilidade de reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto, menores custos nas mudanças de moldagem motivadas pelo menor custo ferramental e tempos de ciclo potencialmente menores.

Entre as desvantagens pode-se citar: maior geração de moagem, espessura de parede mais variável e menos controlável e menor complexidade da peça.

#### **4.1.4 Definição do processo para a construção do coletor**

Para a definição do processo de fabricação dos coletores poliméricos a ser utilizado nesse trabalho foram analisados os diversos parâmetros envolvidos e comentados anteriormente.

Os processos de moldagem por extrusão e injeção seriam os dois processos ideais para a confecção de superfícies absorvedoras com canais de escoamento incorporadas no próprio processo de fabricação. Porém, a necessidade de confecção de várias matrizes de extrusão e de injeção para as diferentes partes do coletor, tais como a placa absorvedora, os cabeçotes de distribuição e a caixa de vedação, além das elevadas dimensões físicas do coletor solar, envolveria tanto o uso de máquinas de grande capacidade além do custo elevado para a fabricação de matrizes.

O processo escolhido para atingir os objetivos do trabalho foi o de termomoldagem por termoformagem. As matrizes para esse processo são de construção simples e de fácil manutenção e as máquinas envolvidas no processo são de baixo custo se comparadas às citadas anteriormente, também são fáceis de operar e disponíveis com maior facilidade. Associado a isso, permite também a confecção de produtos com áreas relativamente grandes, conveniente para a construção de coletores solares térmicos.

#### **4.1.5 Soldagem de Termoplásticos**

Existem várias técnicas para soldagem de termoplásticos, incluindo: selagem dielétrica, gás quente, prato quente, ferramenta quente, fricção, vibração e solda por ultrassom.

Segundo Blass (1988), independentemente da técnica, a soldagem é realizada por calor que une os materiais termoplásticos a partir de um processo de fusão localizada e controlada. Após a fusão, a área é resfriada e com o endurecimento do material é formada a junta ou solda, completando assim o processo de soldagem.

Na determinação da melhor técnica a ser utilizada, muitos fatores devem ser considerados: resistência mecânica requerida, a forma e tamanho das partes a ser unidas, o equipamento a ser empregado, e se é preciso que a solda não seja aparente no produto final. Também deve ser considerada a compatibilidade entre os materiais a serem unidos. Em todos os tipos de solda é importante estabelecer ajustes de tempo, exposição e pressão que sejam

capazes de fundir as superfícies dos polímeros e manter o contato mecânico durante o resfriamento. Calor excessivo pode levar a uma fusão excessiva e até mesmo a uma degradação do polímero. Calor insuficiente, em contrapartida, produz ligas irregulares e com baixa resistência mecânica.

## 5 PROTÓTIPO DO COLETOR

Para a definição da geometria dos protótipos de coletores solares que foram construídos com materiais poliméricos foram realizadas diversas simulações computacionais, utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3 e utilizando, como base, o programa desenvolvido por Silva (2012), escrito na plataforma do EES.

### 5.1 SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a escolha do processo de fabricação do protótipo foi considerada a questão do custo e simplicidade, sendo que o processo de termoformagem revelou-se como uma opção importante no que se refere ao custo/benefício. Em função do processo, foram escolhidas geometrias de canais de escoamento retangulares, conforme descrito na Fig. 3.7, aumentando-se a área de contato entre placa e fluido e minimizado o efeito aleta.

Para a simulação dos protótipos foram introduzidas algumas modificações no programa desenvolvido por Silva (2012), como por exemplo: tipo e características dos materiais da cobertura e da placa absorvedora, material de isolamento, geometria dos canais, dimensões e adaptações das equações para cálculo da eficiência da aleta e para o fator de eficiência do coletor.

A partir da definição do processo de fabricação, foram feitos contatos com empresas que possuem o processo de termoformagem para a execução do projeto. As empresas que disponibilizaram o equipamento para a fabricação do protótipo apresentaram restrição no que se refere às dimensões da mesa de termoldagem em seus equipamentos. Assim, para a simulação, também foi levada em consideração tal restrição de medidas.

O material utilizado, suas propriedades, as dimensões e as condições de contorno utilizadas para simulação dos coletores estão apresentados na Tab. 5.1.

Foram simulados quatro casos: os casos conforme Tab. 5.2, possuem exatamente as mesmas dimensões de 1 m x 1 m, variando apenas o número de canais e, conseqüentemente, a largura destes. Essa dimensão de coletor é bastante usual e daí sua escolha. Conforme comentado anteriormente, devido às limitações das máquinas disponíveis para a fabricação dos protótipos, foi verificado que as dimensões máximas ficariam em torno de 0,56 m de comprimento e 0,45 m de largura. Para contemplar essa situação foi simulado também um coletor com essa geometria, chamado de caso 1. As dimensões utilizadas em cada um destes

casos estão mostradas na Tab. 5.2. O parâmetro largura da aleta foi fixado em 5 mm. Esta é a medida mínima necessária para o processo de fixação das placas inferior e superior do coletor. O desejável seria que essa largura tendesse a zero, porém isso impossibilitaria o processo de montagem das placas inferior e superior do coletor.

Tabela 5.1: Características técnicas para simulação dos coletores solares

Variáveis de entrada	Descrição
Material da placa coletora	PS
Material da cobertura	PC
Absortividade da placa, $\alpha_p$	0,90
Transmissividade da cobertura, $\tau_c$	0,86
Inclinação do coletor, $\beta$	45°
Condutividade térmica do material da placa coletora, $k_p$	0,15 W/(mK)
Condutividade térmica do material da cobertura, $k_c$	0,2 W/(mK)
Distância entre placa absorvedora e cobertura, $L_{c,p}$	0,01 m
Emissividade da placa absorvedora, $\varepsilon_p$	0,90
Espessura do isolamento de base, $L_b$	0,025 m
Espessura do isolamento do contorno do coletor, $L_e$	0,025 m
Espessura da placa coletora, $\delta_p$	0,002 m
Espessura da cobertura, $\delta_c$	0,002 m
Distanciamento entre canais, $(W-L_c)$	0,005 m
Vazão mássica, $\dot{m}_c$	0,02 kg/(s,m <sup>2</sup> )
Transmissividade da cobertura, $\tau_c$	0,90
Umidade relativa do ar	70%
Irradiância solar incidente, $G_T$	800 W/m <sup>2</sup>
Velocidade do ar, $V_{ar}$	2 m/s
Temperatura ambiente, $T_a$	30 °C
Refletividade do solo, $\rho_g$	0,2
Ângulo de incidência da radiação solar, $\theta$	0°

Tabela 5.2: Dados das geometrias dos coletores para simulação

Variáveis de entrada	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Altura interna do canal, $L_{hi}$	0,008 m	0,008 m	0,008 m	0,008 m
Comprimento placa absorvedora, $L_{eq}$	0,56 m	1 m	1 m	1 m
Largura da placa absorvedora, $L_{larg}$	0,45m	1 m	1 m	1 m
Número de canais, $N$	5	11	5	20
Largura interna do canal, $L_{ci}$	0,085 m	0,085 m	0,196 m	0,045 m
Comprimento do canal do coletor, $L$	0,56 m	1 m	1 m	1 m

Os resultados das quatro simulações são apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.6.

Tabela 5.3: Resultados da Simulação (Caso 1)

$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,p}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$(T_m - T_a)/G_T$ ( $\text{m}^2\text{C/W}$ )	$\eta_p$ (%)
29,7	30,3	88,0	0	20,70
37,7	38,3	89,9	0,01	18,53
45,8	46,2	91,7	0,02	16,36
53,8	54,2	93,5	0,03	14,17
61,8	62,2	95,4	0,04	11,98
69,9	70,1	97,2	0,05	9,77
77,9	78,1	99	0,06	7,56
85,9	86,1	100,8	0,07	5,33
93,9	94,0	102,6	0,08	3,10
102	102	104,4	0,09	0,86
110	110	110	0,1	0,00

Tabela 5.4: Resultados da Simulação (Caso 2)

$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,p}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$(T_m - T_a)/G_T$ ( $\text{m}^2\text{C/W}$ )	$\eta_p$ (%)
25,6	34,4	33,8	0	75,59
34	42,0	41,4	0,01	69,48
42,3	49,7	49,0	0,02	63,1
50,7	57,3	56,7	0,03	56,45
59,1	64,90	64,3	0,04	49,53
67,5	72,5	71,9	0,05	42,32
76	80,0	79,6	0,06	34,83
84,4	87,6	87,2	0,07	27,04
92,9	95,1	94,9	0,08	18,94
101,4	102,6	102,5	0,09	10,52
109,9	110,1	110,1	0,1	1,795

Tabela 5.5 : Resultados da Simulação (Caso 3)

$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,p}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$(T_m - T_a)/G_T$ ( $\text{m}^2\text{C/W}$ )	$\eta_b$ (%)
25,8	34,2	37,5	0	72,61
34,1	41,8	44,8	0,01	66,68
42,5	49,5	52,0	0,02	60,5
50,8	57,1	59,3	0,03	54,07
59,2	64,8	66,6	0,04	47,39
67,6	72,4	73,9	0,05	40,44
76,0	80	81,2	0,06	33,24
84,5	87,5	88,4	0,07	25,77
92,9	95,1	95,7	0,08	18,02
101,4	102,6	102,9	0,09	9,995
109,9	110,1	110,2	0,1	1,702

Tabela 5.6: Resultados da Simulação (Caso 4)

$T_i$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_o$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m,p}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$(T_m - T_a)/G_T$ ( $\text{m}^2\text{C/W}$ )	$\eta_b$ (%)
25,6	34,4	32,4	0	76,67
33,9	42,1	40,1	0,01	70,52
42,3	49,7	47,9	0,02	64,07
50,7	57,3	55,7	0,03	57,34
59,0	64,9	63,4	0,04	50,33
67,5	72,5	71,2	0,05	43,02
75,9	80,1	79	0,06	35,42
84,4	87,6	86,8	0,07	27,52
92,9	95,1	94,5	0,08	19,28
101,4	102,6	102,3	0,09	10,72
109,9	110,1	110,1	0,1	1,83

Os resultados apresentados nas tabelas 5.3 a 5.6 são plotados na Fig. 5.1 e na 5.2 para uma melhor compreensão da influência da geometria do coletor no seu desempenho térmico. Em relação à largura do canal, o canal de 45 mm de largura, caso 4, apresentou desempenho levemente superior ao de 85 mm, (caso 2) e ambos com desempenho térmico superior ao de 196 mm. O desempenho inferior apresentado pelo caso 1, com canal de 85 mm de largura era esperado em função de sua área ser aproximadamente 72,5% menor que os demais ( $0,275 \text{ m}^2$  contra  $1 \text{ m}^2$ ) e, principalmente, por apresentar menor comprimento dos canais, o que afeta

significativamente a transferência de calor para o fluido de trabalho. No entanto, como explicado anteriormente, essa limitação decorre da máquina disponível para a fabricação dos protótipos de coletores solares.

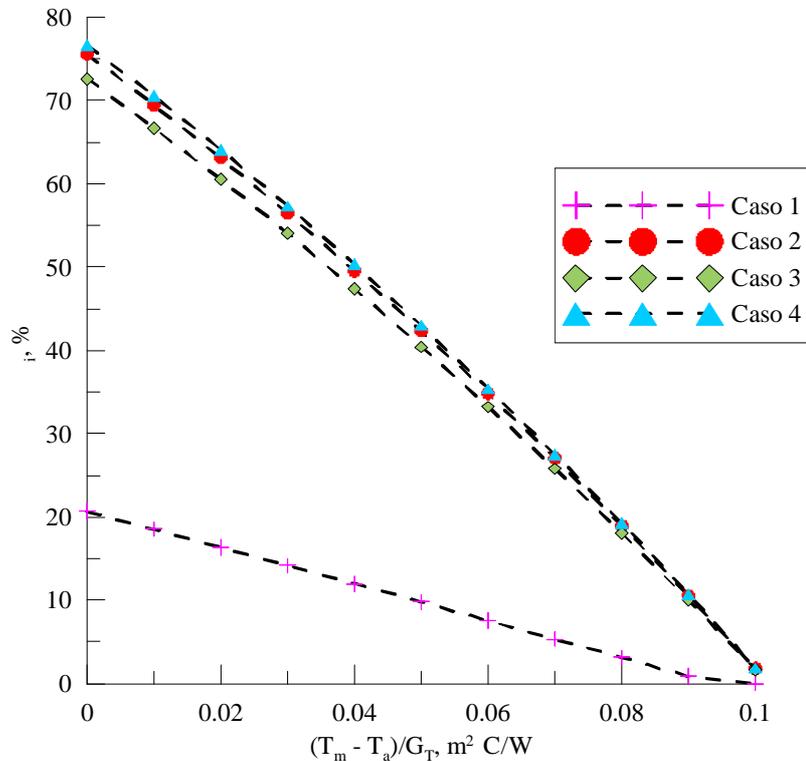


Figura 5.1 - Curva de eficiência simulada para as geometrias de coletores solares

Em coletores solares poliméricos, o rendimento é inversamente proporcional à dimensão da aleta, já que estes materiais não possuem uma boa condutividade térmica. Assim, quanto maior a área de contato entre fluido de trabalho e a placa absorvedora, maior é a transferência de calor.

O espaçamento utilizado entre os canais nesta simulação foi de 5 mm, considerando que é necessário uma área de colagem para a fixação entre as partes superior e inferior do coletor a fim de que este suporte a pressão de trabalho do sistema.

Esta observação motivou a construção de um protótipo físico para a comprovação dos resultados teóricos, que será apresentada na continuação.

## 5.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE COLETOR SOLAR POLIMÉRICO

A análise do processo de conformação do coletor foi criteriosamente observada para que o projeto se tornasse viável conforme as condições desse trabalho. O processo que melhor atendeu as exigências foi o processo de termoldagem. Este processo consiste em aquecer uma placa de material polimérico através de resistências elétricas, sendo colocado abaixo desta uma matriz com a geometria que se deseja da peça. Depois de aquecida, a placa polimérica, uma bomba de vácuo retira o ar que está entre a placa e a matriz através de pequenos orifícios posicionados estrategicamente, possibilitando que a placa adquira a geometria da matriz. Este processo é rápido e de fácil operação.

### **5.2.1 Dimensionamento do coletor**

Para dimensionamento do coletor foi escolhido o caso 1 da simulação feita no software EES. Essa escolha se deve ao fato de que o comprimento do tubo do coletor simulado no caso 1 é de 0,56 m. Essa é a medida máxima possível para a fabricação do protótipo utilizando a máquina de termoformagem que se tem disponível. Por esse motivo foi escolhido fabricar um protótipo baseando-se no caso 1. Os dados dos parâmetros utilizados no caso 1, estão descritos na Tab. 5.2. As seguintes condições foram observadas:

- Tipo de aleta: por se tratar de um material polimérico de baixa condutividade térmica, existe uma relação inversamente proporcional entre o tamanho da aleta e a eficiência do coletor, ou seja, quanto menor o tamanho da aleta, maior é o rendimento do coletor. Dessa forma foi determinado um comprimento mínimo de aleta, 5mm, o qual é necessário ao processo de fixação das placas superior e inferior por soldagem e que proporciona rigidez à estrutura.
- Dimensionamento da altura do canal: de acordo com os parâmetros da bibliografia estudada e os resultados da simulação, quanto menor a altura dos canais do absorvedor, maior o rendimento do coletor. Assim, foi considerada a altura do canal igual a 8 mm, que é a medida mínima necessária exigida pelo equipamento de termoformagem.
- Para definição do comprimento e largura do coletor, consideraram-se as dimensões máximas da mesa de termoformagem da máquina, que permite a utilização de matrizes com as medidas de até 500x700 mm.

- O material escolhido para a construção do protótipo foi o PS na cor preto fosco. A escolha desse material ocorreu pelo fato de que entre os polímeros indicados para esta aplicação, o PS apresenta boas propriedades mecânicas de plasticidade, desejável ao processo de termoformagem, bem como baixo custo e maior facilidade na aquisição no mercado.

### 5.2.2 Projeto do coletor e da matriz para termoformagem

Para o projeto do coletor solar plano polimérico foi utilizado o software de CAD *Solid Works*. O projeto foi feito seguindo os dados da etapa de dimensionamento. Foram projetados o coletor completo e a matriz para realizar o processo de termoformagem. O projeto do coletor completo é apresentado na Fig. 5.2 e o projeto da matriz e na Fig 5.3.

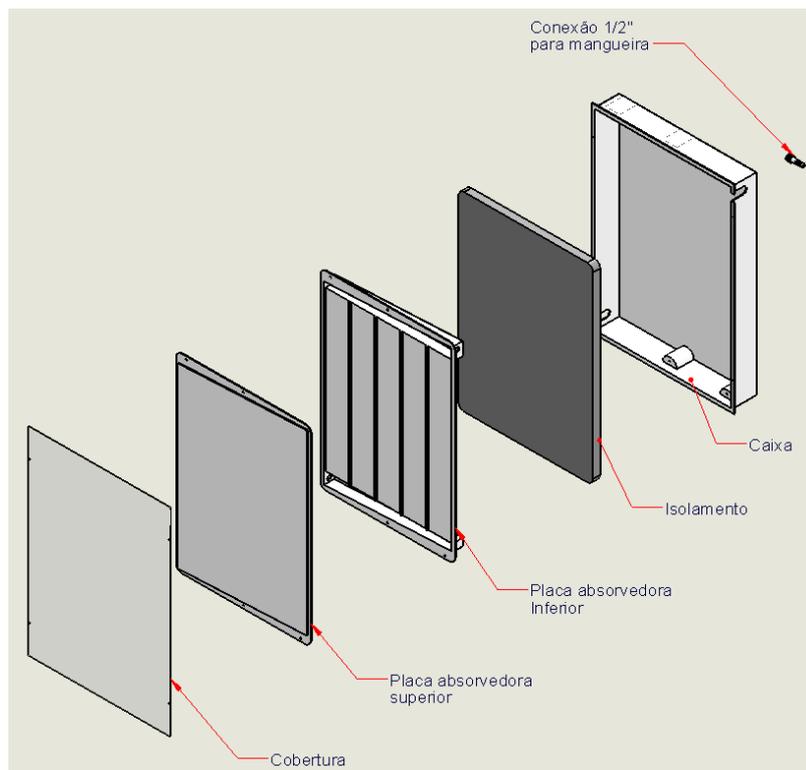
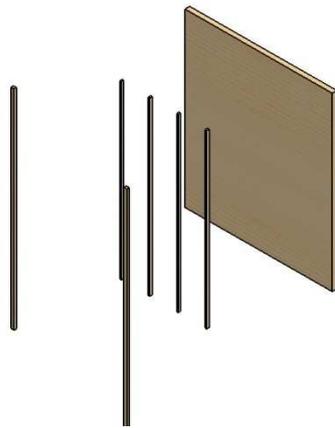


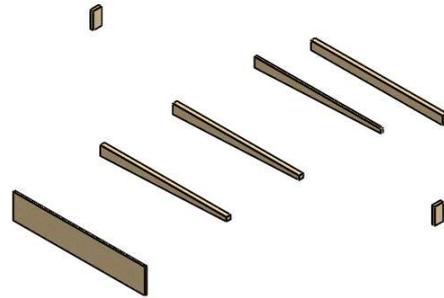
Figura 5.2 - Projeto do coletor solar polimérico (montagem total)

A Fig. 5.3 mostra todas as partes do coletor em vista explodida e como é a montagem do mesmo. Esta montagem envolve primeiramente a caixa, que serve como isolamento entre a parte interna e o meio externo, sendo a estrutura do coletor enquanto o isolamento serve para minimizar a transferência de calor entre a placa e o meio externo. A placa absorvedora

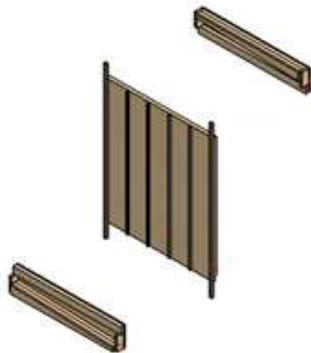
inferior e superior e a cobertura que protege o absorvedor das intempéries minimizam a transferência de calor da placa para o meio externo.



a) Montagem da placa base



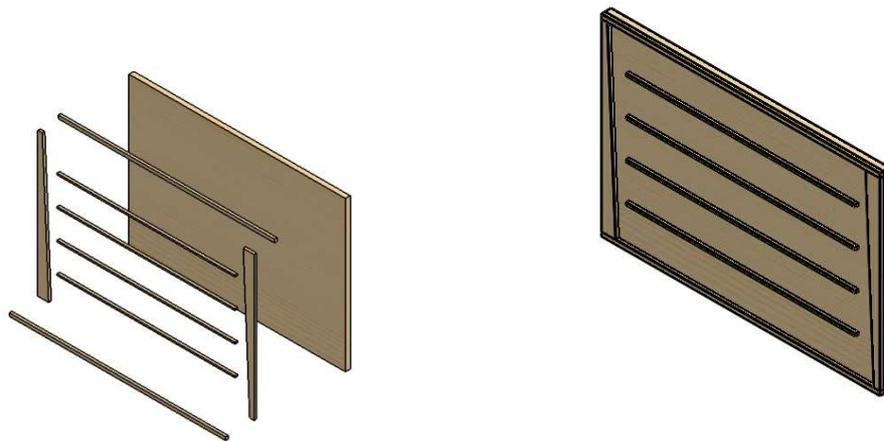
b) Montagem da lateral



c) Sequência de montagem da placa inferior

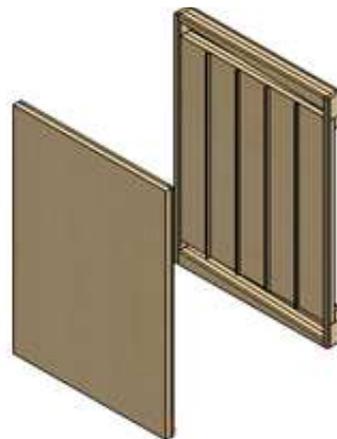


d) Montagem final da placa inferior



e) Sequência de montagem da placa superior

f) Montagem final da placa superior



g) Montagem total da matriz

Figura 5.3 - Detalhes da montagem da matriz para termoformagem do coletor solar polimérico

A Fig. 5.3 mostra cada etapa da construção da matriz que definiu as dimensões do coletor, suas partes e a sequência de montagem.

A matriz foi construída na sede do SENAI – CETEMO em Bento Gonçalves, RS. O material utilizado foi fibra de madeira com resinas sintéticas, conhecida como MDF (Fibra de Média Densidade). Na Fig. 5.4a, a parte inferior da matriz da placa absorvedora passou pelo processo de corte das peças individuais, acabamento e montagem. Na Fig. 5.4b, a matriz está sendo unida com adesivo a base de água e fixada com pequenos grampos, formando assim a base do absorvedor. Na Fig. 5.4c mostra-se a fixação das peças da matriz superior da placa

absorvedora e nas Fig. 5.4d e Fig. 5.4e mostra-se o conjunto matriz quando fechada e aberta, respectivamente.



a) Fixação entre a base e o cabeçote de alimentação



b) Parte inferior da matriz (montada)



c) Parte superior da matriz (montada)



d) Parte inferior e superior (montada)



e) Parte inferior e superior da matriz (desmontadas)

Figura 5.4 - Construção da matriz para termoformagem do coletor solar polimérico

### 5.2.3 Termoformagem do protótipo

A etapa de termoformagem foi realizada na empresa Cango Acessórios na cidade de Bento Gonçalves. Para o processo foi utilizado o material PS na cor preto fosco, previamente

definido através da simulação. O equipamento utilizado foi o modelo F-75 da marca HIMAFE conforme Fig. 5.5.



Figura 5.5 - Máquina de termoformagem

A matriz construída foi colocada na mesa de termoformagem, fixada com parafusos e coberta com uma chapa de PS com 3 mm de espessura. Na sequência, foi iniciado o processo onde um cabeçote com um grupo de resistências elétricas avança sobre o conjunto matriz e chapa de PS, atingindo a temperatura de 120 °C por um período de 60 s. Simultaneamente, uma bomba de vácuo localizada na parte inferior da máquina, retira o ar do processo puxando a chapa de PS em direção à matriz realizando assim o processo de termoformagem conforme mostrado na Fig. 5.6.

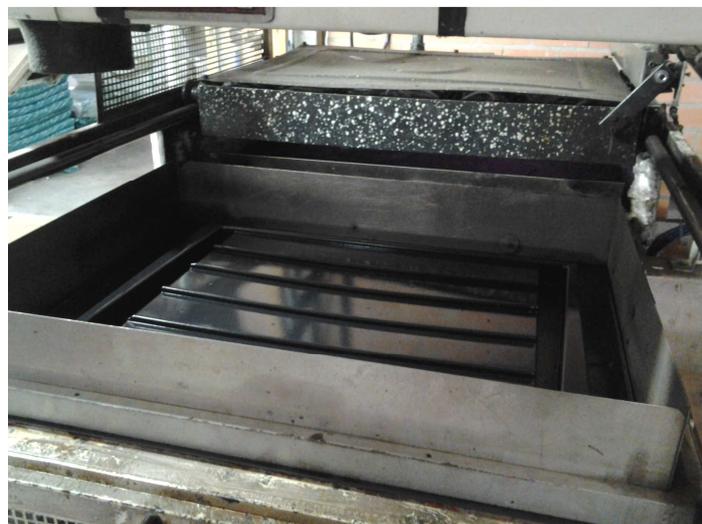


Figura 5.6 - Placa do coletor após a termoformagem

Para que a termoformagem fosse realizada com eficiência foram feitos furos na matriz, permitindo assim a completa retirada do ar pela bomba de vácuo. Na Fig. 5.7 é apresentado o resultado da termoformagem do coletor após a extração da matriz.



Figura 5.7 - Coletor solar polimérico extraído da matriz.

Após a retirada da matriz foi necessário fazer a remoção das rebarbas de material do protótipo. O resultado do protótipo do coletor solar polimérico aberto está ilustrado na Fig. 5.8.



Figura 5.8 - Protótipo de um coletor solar plano polimérico aberto

A Fig. 5.9 mostra a união das placas superior e inferior através de adesivo autocolante, marca 3M, com características técnicas especiais para a união de material polimérico PS.



Figura 5.9 - Protótipo de um coletor solar plano polimérico

#### 5.2.4 Teste de desempenho do coletor solar

Após a construção do protótipo foram realizados os testes para a determinação do desempenho térmico do coletor solar, realizados no Laboratório de Fontes Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Os testes foram realizados conforme a norma ABNT NBR 15747-2 Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores Solares. Parte 2: Métodos de ensaio, cuja metodologia foi descrita na seção 3.16. do Cap. 3. A montagem do sistema de testes, que engloba os equipamentos descritos na Tab. 5.7 está apresentada na Fig. 5.10.

Tabela 5.7: Equipamentos utilizados na bancada de testes de coletores solares

Equipamento	Descrição técnica	Descrição	Incerteza
Piranômetro	EPPLEY Modelo PSP	1	$\pm 0,1$
Bomba	Texius, modelo TBHX-BR	2	
Medidor de vazão	YOKOGAWA, Eletromagnético	3	$\pm 1\%$
Suporte coletor	Tubo aço AISI 1020 pintado	4	
Reservatório	Komeco 200 L com resistência elétrica interna de 3.000 W	5	
Acessórios	Mangueiras/abraçadeiras/engates rápidos	6	
Quadro elétrico	Acionamento da bomba e do medidor de vazão	7	
Sensores de temperatura	Tipo PT 100	8	$\pm 0,1$

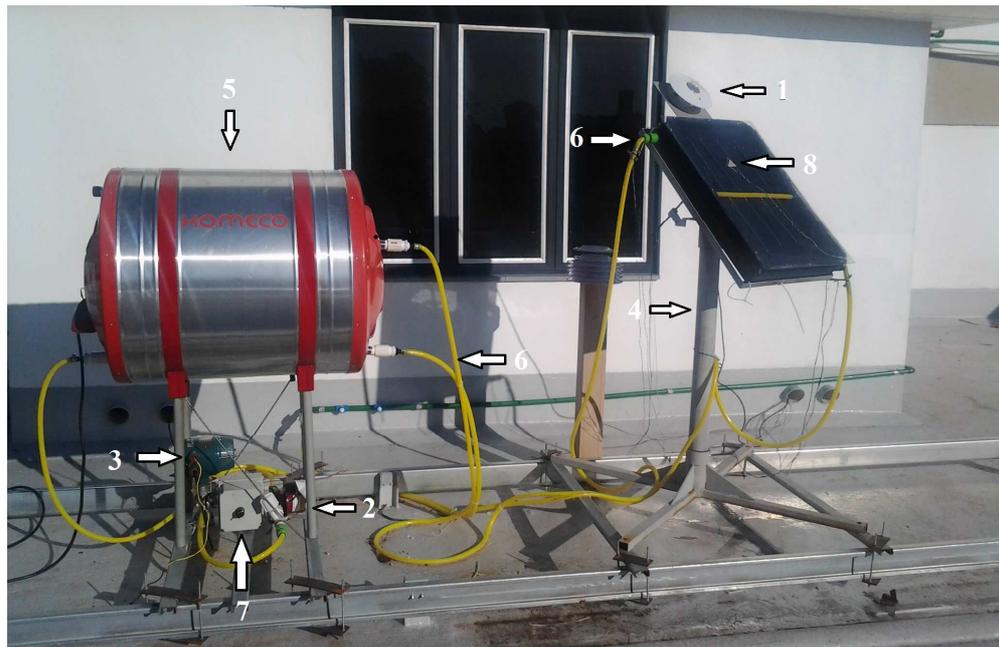


Figura 5.10 - Disposição dos equipamentos e acessórios

Na Fig. 5.11 estão apresentadas as conexões do processo de circulação do fluido de trabalho entre coletor, bomba, reservatório e dispositivos de medição, conforme descrição contida na Tab. 5.8.

Tabela 5.8: Posição das conexões das entradas e saídas do fluido de trabalho nos vários dispositivos da bancada.

Tabela 5.8: Posição dos acessórios

Localização	Descrição
Respiro do reservatório	A
Saída de água do reservatório para alimentação da bomba	B
Saída de água da rede hidráulica para alimentação do reservatório	C
Entrada da bomba	D
Saída da bomba	E
Entrada do medidor de vazão	F
Saída do medidor de vazão para alimentação do coletor	G
Entrada do coletor	H
Saída do coletor	I
Entrada de água quente no reservatório	J



Figura 5.11 - Posição das conexões de entrada e saída

O fluido de trabalho sai do reservatório K, entra na bomba D, passa pelo medidor de vazão F, entra na parte inferior do coletor H, onde é aquecido, sai pela parte superior do coletor I e retorna ao reservatório pela entrada J.

O sistema trabalha em regime fechado sendo acionado por uma bomba e juntamente com uma válvula cuja finalidade é manter controlada a vazão da água na entrada do coletor.

Os sensores do tipo PT100 medem a temperatura na entrada e saída do fluido do coletor, bem como a temperatura ambiente. Cada sensor foi encapsulado em um tubo de cobre de 6,3 mm (1/4") de diâmetro onde uma extremidade foi fechada por solda. O tubo foi preenchido como óxido de magnésio para minimizar a resistência térmica de contato entre sensor e tubo e eliminar a presença de ar.

Os sensores de temperatura do fluido estão localizados nas extremidades do coletor fixados na mangueira de entrada e saída através de abraçadeiras. O sensor de temperatura do ar foi fixado no suporte do coletor exposto ao ar ambiente e fora da região de incidência solar.

O sensor de temperatura da placa absorvedora (PT 100) está fixo a ela através de pasta térmica e recoberto por uma fita adesiva reflexiva para que os raios solares não aqueçam o sensor, interferindo nos resultados. A posição deste sensor está localizada a  $\frac{3}{4}$  da posição de entrada do fluido, medindo assim a temperatura da placa na parte superior do coletor.

O reservatório possui uma resistência elétrica que aquece a água até a temperatura ajustada, controlada por um termostato e a mantém nesta temperatura durante a duração do ensaio.

O piranômetro mede a irradiação solar global incidente na superfície do coletor solar, cuja inclinação e posicionamento são realizados manualmente, minimizando o ângulo de incidência solar. Os dados são monitorados por um sistema de aquisição de dados, composto por um multímetro com multiplexadores, marca Agilent 94970A, controlado por um computador. Os dados são medidos a cada segundo e armazenados para posterior análise. Esse sistema é apresentado na Fig. 5.12.

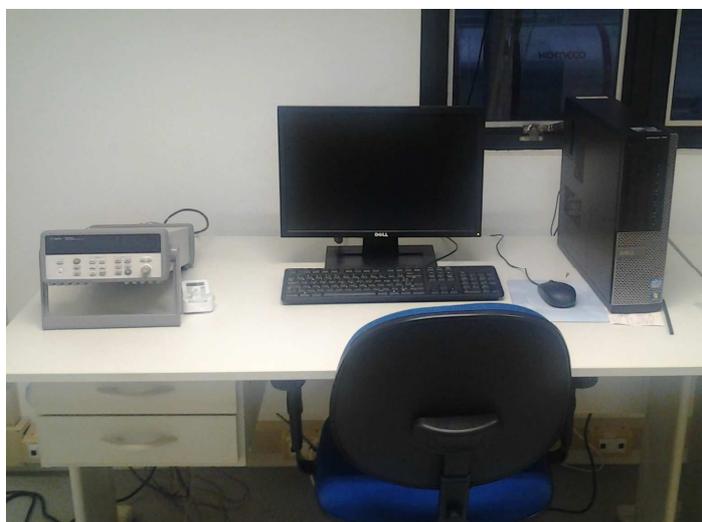


Figura 5.12 - Sistema de aquisição de dados da bancada experimental.

As medições foram realizadas entre os meses de Maio a Agosto de 2013. Dos ensaios realizados nesse período, somente oito dias foram efetivamente utilizados para a análise dos dados, uma vez que as condições meteorológicas desse período foram desfavoráveis, com elevada precipitação, sequência de dias com baixa irradiação solar ou com presença significativa de nuvens.

Após o tratamento dos dados coletados durante os diversos ensaios, foram utilizados somente aqueles que atendiam as condições estabelecidas pela Norma, baseado na condição de regime permanente.

A Norma ABNT NBR 15747-2 (2009) indica que para considerar os dados coletados como válidos, os testes devem obedecer aos seguinte parâmetros: ângulo de incidência de

radiação direta,  $\theta$ , deve ser menor que  $20^\circ$ . A irradiância solar global  $G_T$ , deve ser maior que  $700 \text{ W/m}^2$ , já a irradiância solar difusa deve ser menor do que 30%. Os níveis de variação da irradiância solar devem ficar abaixo de  $50 \text{ W/m}^2$ . Quanto a velocidade do ar,  $V_{ar}$ , deve estar entre 1 e 4 m/s. A taxa de massa  $\dot{m}_c$  deverá estar em  $0,02 \pm 1\% \text{ kg/s}$ . Para a variação da temperatura de entrada o indicado é  $\pm 0,1 \text{ K}$ , enquanto que a temperatura ambiente  $\pm 1 \text{ K}$ . Esses foram os parâmetros considerados para escolher os dados coletados a serem analisados. Aqueles dados que não atenderam a algum dos parâmetros acima indicados foram descartados. No apêndice B encontra-se a tabela com os dados coletados.

Na Fig. 5.13 está apresentado o gráfico de eficiência do coletor testado, conforme os dados experimentais.

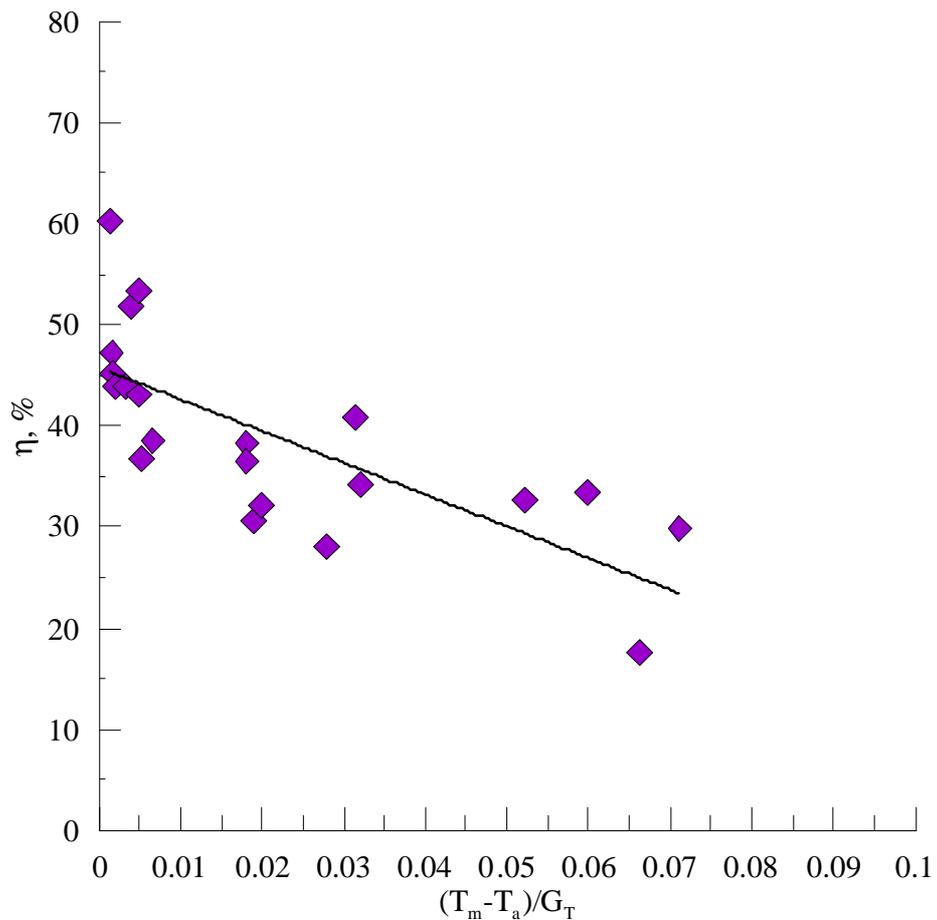


Figura 5.13 - Curva de desempenho térmico experimental do coletor solar polimérico.

Na Fig. 5.14 é apresentado a variação das temperaturas ambiente ( $T_a$ ), de entrada da água ( $T_i$ ) e de saída da água ( $T_o$ ) em função da radiação.

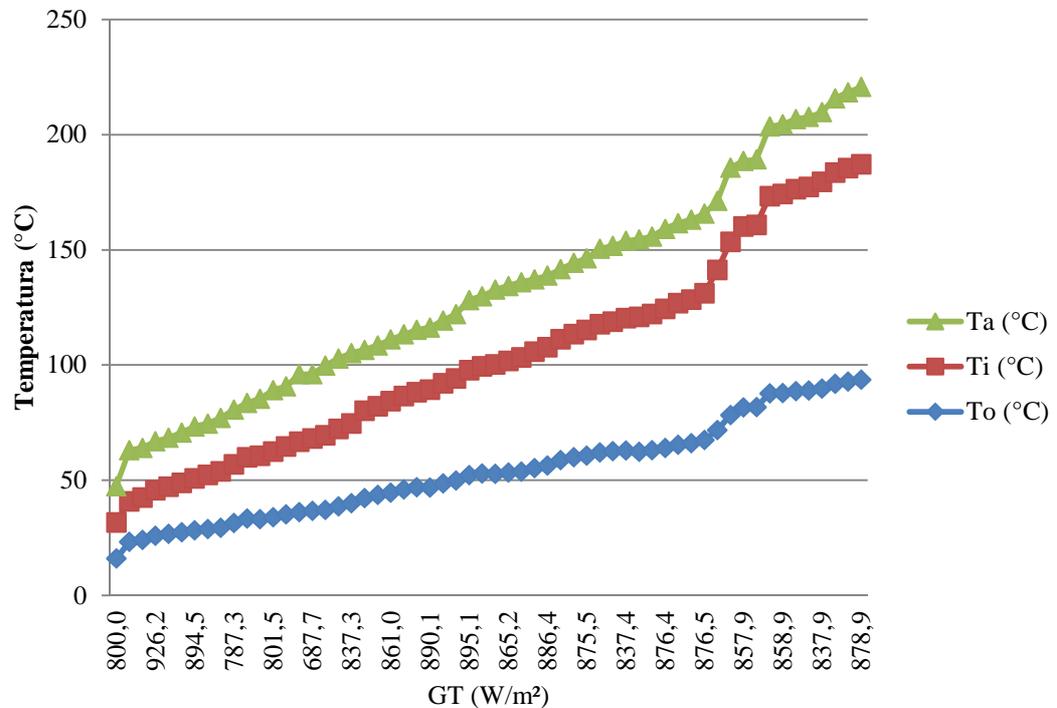


Figura 5.14 - Curva das temperaturas em função de  $G_T$ .

A máxima eficiência do protótipo do coletor,  $\eta_o$ , foi de aproximadamente 45%, representando suas perdas óticas. Em comparação com o modelo teórico do coletor apresentado no Capítulo 3, esse valor é aproximadamente igual ao produto  $F_R(\tau\alpha)$ . O coeficiente de perdas térmicas,  $F_R U_L$ , calculado para esse coletor, é de  $3,2$  ( $^{\circ}\text{Cm}^2$ )/W, que representa a inclinação da reta mostrada na Fig. 5.13, obtida a partir da regressão linear dos pontos experimentais.

Quando esses resultados são comparados com os obtidos pela simulação computacional, mostrados na Fig. 5.1, notam-se algumas diferenças. Para os coletores simulados, os valores de perdas óticas,  $\eta_o$ , ficam em torno de 75% enquanto os coeficientes de perdas térmicas,  $F_R U_L$ , ficam em torno de  $7,1$  ( $^{\circ}\text{Cm}^2$ )/W.

Não foi possível controlar as temperaturas de entrada e saída da água, conforme é exigido na norma utilizada para referência. Esse fato ocorreu em função de que a bancada

onde os testes foram realizados não possuía recursos para isso. Dessa forma, em alguns pontos do experimento a norma foi flexibilizada.

Em relação às perdas óticas, o modelo usado na simulação utiliza valores médios das propriedades do material da cobertura, nesse caso o policarbonato, desconsiderando o caráter espectral destes parâmetros. Como pode ser visto na Fig. 2.13, a transmissividade do policarbonato tanto para ondas curtas (visível) quanto para ondas longas (região do infravermelho) apresenta elevada dependência com o comprimento de onda. Outro fator importante, que pode afetar a comparação entre dados experimentais e simulados, é que essas propriedades variam conforme o produto e o fabricante do material.

O protótipo de coletor ensaiado possui área da superfície absorvedora inferior à área do coletor utilizado na simulação dos casos 2, 3 e 4, de aproximadamente  $1/4$  ( $0,252 \text{ m}^2$  contra  $1 \text{ m}^2$ ), conforme mencionado anteriormente. Além disso, o comprimento do protótipo foi de aproximadamente 50% do comprimento do coletor simulado, o que afeta a distribuição de temperatura do fluido ao longo do comprimento e na temperatura de saída do coletor, diminuindo a temperatura média da placa absorvedora e, como consequência, diminuindo a taxa de transferência de calor para o meio (perdas térmicas). Durante os ensaios a temperatura da placa absorvedora foi monitorada através de um sensor de temperatura colocado na placa, conforme descrito anteriormente. A máxima temperatura alcançada foi de  $78 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme mostrado na Fig. 5.14. Na mesma figura estão plotados os dados simulados para essa mesma temperatura. Como pode ser visto, os valores simulados são superiores aos medidos, o que mostra que as perdas térmicas simuladas são subestimadas.

A variabilidade dos resultados experimentais também pode ser um fator importante na comparação e que demonstra que o controle das condições operacionais durante os ensaios deve ser aperfeiçoado.

Os resultados obtidos durante os ensaios mostram que o desempenho térmico apresentado pelo protótipo de coletor solar polimérico é satisfatório para a finalidade desejada. Aumentando a área da superfície absorvedora e, principalmente, aumentando o comprimento do coletor, seu desempenho térmico deve ficar próximo de um coletor solar convencional.

Os resultados obtidos também mostram que o desenho de novas geometrias para os canais de escoamento e a diminuição da largura das aletas entre os canais, minimiza

significativamente a desvantagem da baixa condutividade térmica apresentada pelos materiais poliméricos.

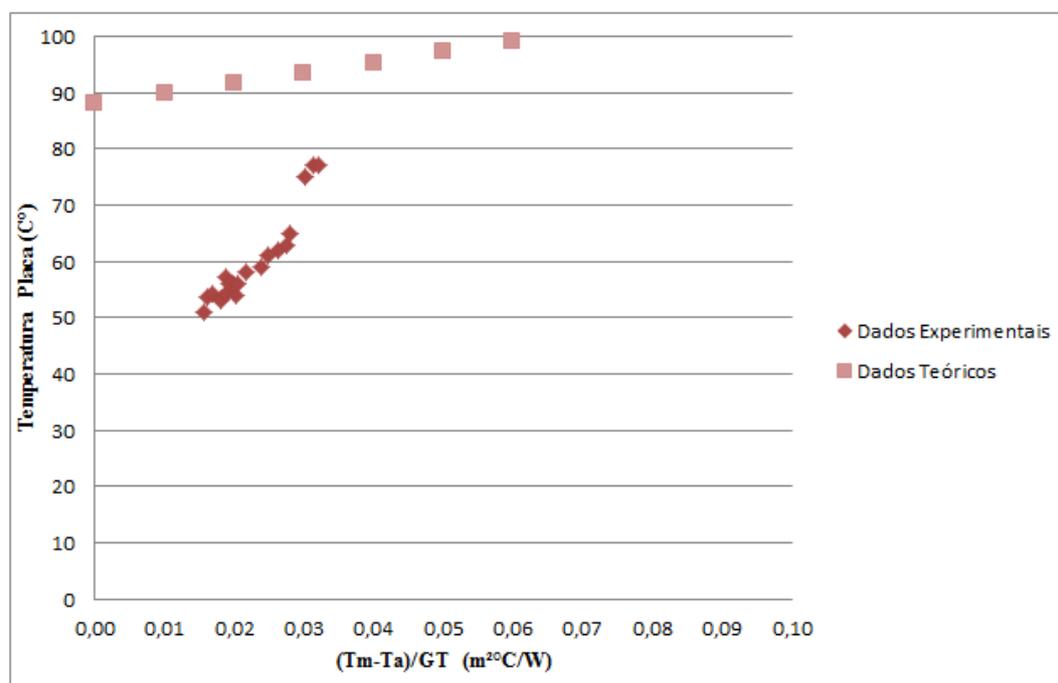


Figura 5.14 - Dados medidos e simulados para a temperatura da placa absorvedora

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi simulado, projetado e construído um protótipo de coletor solar plano utilizando material polimérico. O objetivo do estudo foi verificar a viabilidade da utilização desse conceito de coletor na aplicação do aquecimento de água para substituição de chuveiros elétricos com a finalidade de beneficiar famílias de baixa renda no Brasil.

No decorrer da análise bibliográfica foi realizado um estudo a fim de identificar os materiais poliméricos, cujas características são desejáveis para o uso na construção dos coletores solares planos. Nesse mesmo sentido foi avaliado o efeito que a geometria do coletor exerce sobre o seu desempenho.

Para a simulação foi utilizado um programa computacional desenvolvido através do software EES e, através da introdução de algumas modificações na metodologia de cálculo para permitir a análise de novas geometrias, foi estimado o desempenho térmico desses coletores.

Após as análises teóricas e as simulações computacionais, foi projetado e construído um protótipo de coletor solar plano polimérico, baseando-se nos parâmetros de material e geometria estudados. O protótipo foi construído utilizando-se o poliestireno como material base do coletor e uma cobertura de policarbonato. O processo utilizado para sua construção foi a termomoldagem.

O protótipo foi ensaiado no Laboratório de Fontes Renováveis da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, observando a norma ABNT NBR 15747-2 Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores Solares. Parte 2: métodos de ensaio, utilizando uma bancada desenvolvida para essa finalidade.

As temperaturas de entrada e saída não puderam ser controladas conforme exigência da norma, bem como não foi realizada a medição da velocidade do vento durante os experimentos, razões que impediram que a norma de referencia fosse atendida em sua totalidade.

Outro parâmetro importante que não pode ser controlado com precisão foi a variação da temperatura de entrada. Esse parâmetro deveria variar no máximo até 0,1° C. Porém, no experimento verificou-se uma variação na casa de 1 °C, fato que ocasionou uma oscilação nos valores obtidos para o rendimento do coletor, conforme verificado no gráfico da Fig. 5.13. A explicação para essa variação de temperatura pode estar associada ao fato de que as tubulações não possuíam isolamento térmico.

Os ensaios realizados com o protótipo mostraram resultados promissores em relação ao desempenho térmico do coletor, mesmo tendo uma área de superfície absorvedora bastante inferior aos coletores convencionais. Estima-se que com o aumento da área da superfície absorvedora, bem como o aumento do comprimento do coletor será possível atingir rendimentos similares aos de coletores solares existentes no mercado.

Um dos importantes resultados obtidos com a realização desse estudo é que o desenho de novas geometrias para os canais de escoamento, bem como a diminuição da largura das aletas entre os canais, contribui para a minimização da desvantagem que materiais poliméricos apresentam em relação à sua baixa condutividade térmica.

Embora a temperatura de transição vítrea (temperatura na qual o polímero torna-se duro e quebradiço) do material PS, utilizado na construção do protótipo, ser de 95 °C, uma dos menores entre os possíveis polímeros indicados para a aplicação, ainda assim percebeu-se a viabilidade da utilização do mesmo em placas absorvedoras, pois considerando o controle da temperatura de estagnação, pode-se dizer que o material obteve um desempenho satisfatório durante os testes.

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se que sejam realizados testes experimentais com outras opções de geometrias para uma análise mais completa sobre o efeito que diferentes formas geométricas exercem sobre o rendimento de coletores poliméricos. Sugere-se também desenvolver protótipos com outros tipos de materiais poliméricos, com maior resistência à temperatura e que sejam realizados ensaios de durabilidade desses coletores.

## REFERÊNCIAS

- ABES, 2006. **Atlas brasileiro de energia solar**. Ênio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Rüther. - São José dos Campos: INPE, 2006. il. 60p.; 2006.
- ABNT, NBR 15747-2: **Sistemas solares térmicos e seus componentes** – Coletores solares. Parte 2: Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- ADDEO, G.; Campanile, L.; Nicolais, G.; Romeo. **A plastic solar collectors for 'low energy' applications**. Applied Energy, Vol. 6, 1980, pp. 265-274.
- ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- ANEEL, **Estrutura Tarifária Para o Serviço de Distribuição de Energia Elétrica**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010, pp.15-16.
- ASHRAE, **Standard 93-2010 - Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2010.
- BLASS, A. **Processamento de Polímeros**, Universidade Federal de Santa Catarina, Editora da UFSC, 2ª. edição, Florianópolis, 1988.
- BLAGA, A. **Use plastics in solar energy applications**. Solar Energy, Vol. 21, 1978, pp. 331-338.
- BLISS, R. W. Jr., **The Derivation of Several 'Plate-Efficiency Factors' Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors**. Solar Energy, vol, 3 (4), pp. 55-64, 1959.
- BOURNE, R.C.; LEE, E. **Molded polymer solar water heater**. United States Patent, US 6,814,070 B2, 2004.
- BRAZIL, O. A. V., **Estudo da Viabilidade da Produção Local de Aquecedores Solar de Água Aplicado ao Consumo Doméstico em Habitações Populares**. Aracaju: FAP-SE, 2002.

BRAENDLE, S., **Collector Coatings Evolve From Black Paint To Selective Surfaces.** Solar Industry, vol. 3 (10), pp. 30-31, 2006.

BURCH, J. D.; JORGENSEN, G.. **High Temperature Issues For Polymer – Based Solar Thermal Systems.** National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2006.

COLLE, S.; ABREU, S. L.; SALAZAR, J. P.; REGUSE, W. **Impacto da energia solar sobre o pico de demanda de energia dos chuveiros elétricos de famílias de baixa renda no brasil.** In: Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Íbero Americano de Energía Solar. España: ISES, 2004.

DUFFIE, J., A.; BECKMAN, W., A. **Solar Engineering of Thermal Process.** 3ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

EDLIN, F.E. **Plastic glazings for solar energy absorption collectors.** Solar Energy, vol. 2, 1958, pp. 3-6.

GNIELINSKY, V.: **Calculation of mean and mass transfer coefficients in laminar and turbulent using a single equation.** Research in Engineering Vol. 41, pp 145-153 1976.

HOLLANDS, K. G. T.; UNNY, T. E.; RAITHBY, G. D.; LONICEK, L. **Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers.** Transactions of ASME Journal of Heat Transfer Vol. 98, p. 189-193, 1976.

HOTTEL, H.C.; WHILLIER, A. **Evaluation of flat-plate solar collector performance.** *Transaction of the Conference on the Use of Solar Energy: The Scientific Basis, II, Part 1, Section A.* Tucson: University of Arizona Press pp. 74-104, 1955.

HOTTEL, H.C.; WOERTZ. B.B., **Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors.** ASME Transaction, vol. 64, pp. 91-104, 1942.

IBGE. **Análise da viabilidade econômica.** Instituto Brasileiro de geografia e estatística 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 12 de Maio. 2013.

INPE. **Radiação Solar Global Horizontal Média Anual.** Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, 2005. Disponível em: <<http://lba.cptec.inpe.br>>. Acesso em 10 de Março. 2013.

JORGENSEN, G.; TERWILLIGER, K.; BINGHAM, C.; MILBOURNEM. **Durability of Polymeric Glazing and Absorber Materials**. National Renewable Energy Laboratory, Denver, Colorado, pp.7-10, 2005.

KALOGIROU, S. A.; **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª ed, Academic Press, Elsevier, EUA. pp. 119-250, 2009.

KAHLEN, S.; WALLNERB, G.M.; LANGC R.W. **Aging behavior and lifetime modeling for polycarbonate**. Institute for Polymeric Materials and Testing, University of Linz, Linz, Austria, 2010.

KÖHL, M. **Task of the Solar Heating and Cooling Programme of the International Energy Agency**. Sydney, Australia, 2005.

KÖHL, M.; JORGENSEN, G.; BRUNOLD S.; CARLSSON B.; HECK M.; MÖLLER K. **Durability of polymeric glazing materials for solar applications**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 2005.

KÖHL, M.; MEIR, M. G.; PAPILLON G. M. **Polymeric Materials for Solar Thermal Applications**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Freiburg, Germany, 2012.

KOO, M. J. **Development of a flat-plate solar collector design program**. Dissertação de Mestrado, University of Wisconsin, Madison, 2010.

OSWALD, T. A. **Polymer Processing Fundamentals**, Munich: Hanser Publishers, 1994.

PANAPAKIDIS, D. **Solar Water Heating Systems Study Reliability, Quatitative Survey and Life Cycle Cost Method**. Energy Systems & Environment Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, 2010.

PETUKHOV, B. S. **Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties**. Advanced in Heat Transfer, v 61, pp. 503-565, 1970.

PASSOS, L. **Um estudo sobre os impactos técnicos e econômicos da agregação do aquecimento solar de água nos domicílios brasileiros**. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PEREIRA, E. M. et.al. **Energia solar térmica** In: TOMASQUI, M. T. et.al. Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência – Cenergia, 2003.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L.; RÜTHER, R., **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

PRADO, R. T. A., **Levantamento do Estado da Arte: Energia Solar**, Projeto de Tecnologias para Construção Habitacional mais Sustentável, São Paulo, 2007, 60 p.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Rio de Janeiro: Programa nacional de conservação de energia elétrica, 2010.

MCADAMS, W. H. **Heat Transmission**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1954. p. 532.

SANTOS, B., M. **Metodologia de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar para secagem de produtos agrícolas**. Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 2004.

SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 3 ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, pp.70, 1992.

SILVA, D. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para dimensionamento de coletores solares de placa plana**, Universidade Do Vale do Rio dos Sinos, editora da UNISINOS, 1 edição, São Leopoldo,(2012).

TABOR, H., **Solar Collectors Selective Surfaces and Heat Engines**. National Academy of Sciences Symposium.Proceedings of the N.A.S., vol. 47, pp. 1271-1278, 1961.

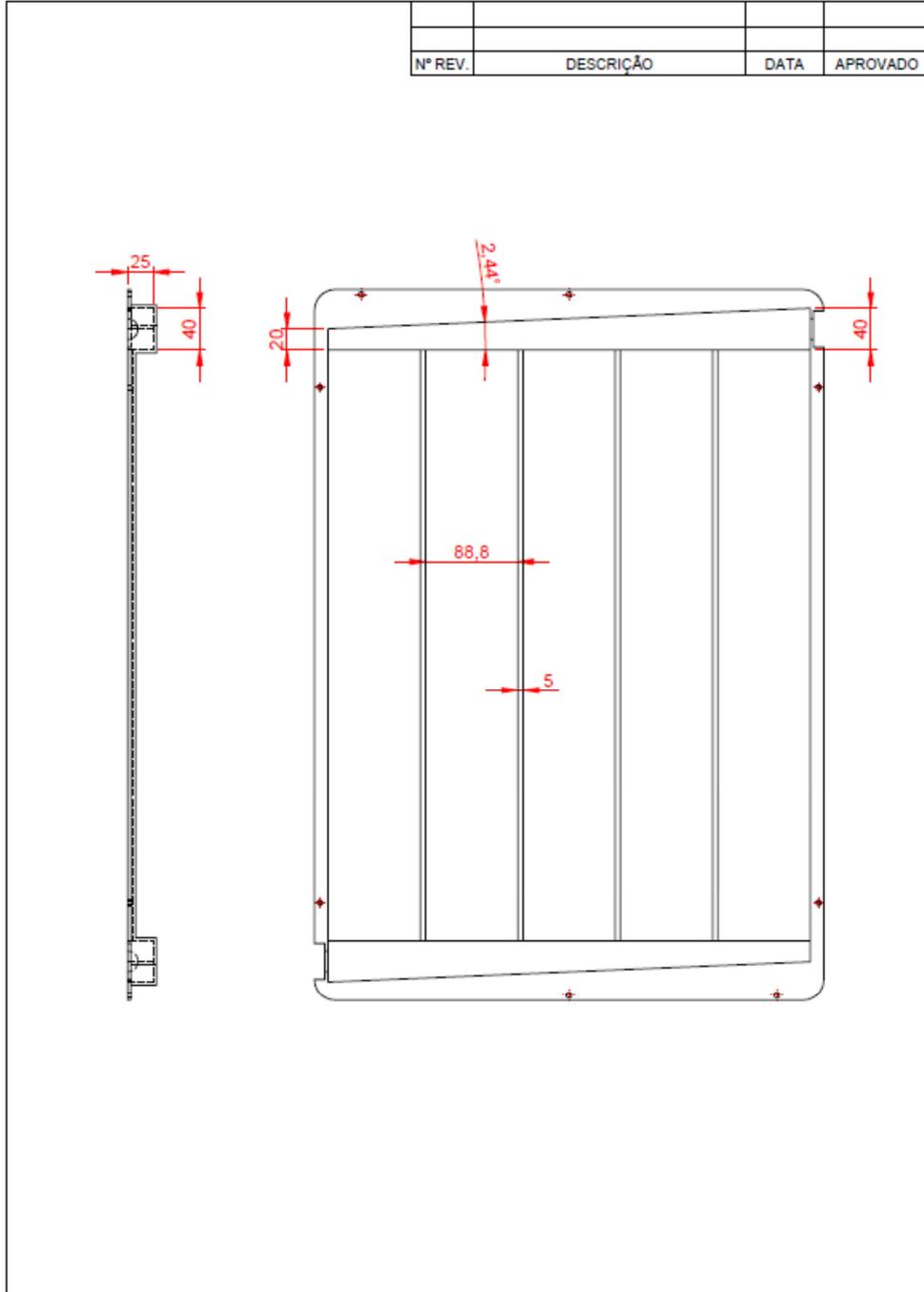
TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.**Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**.Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

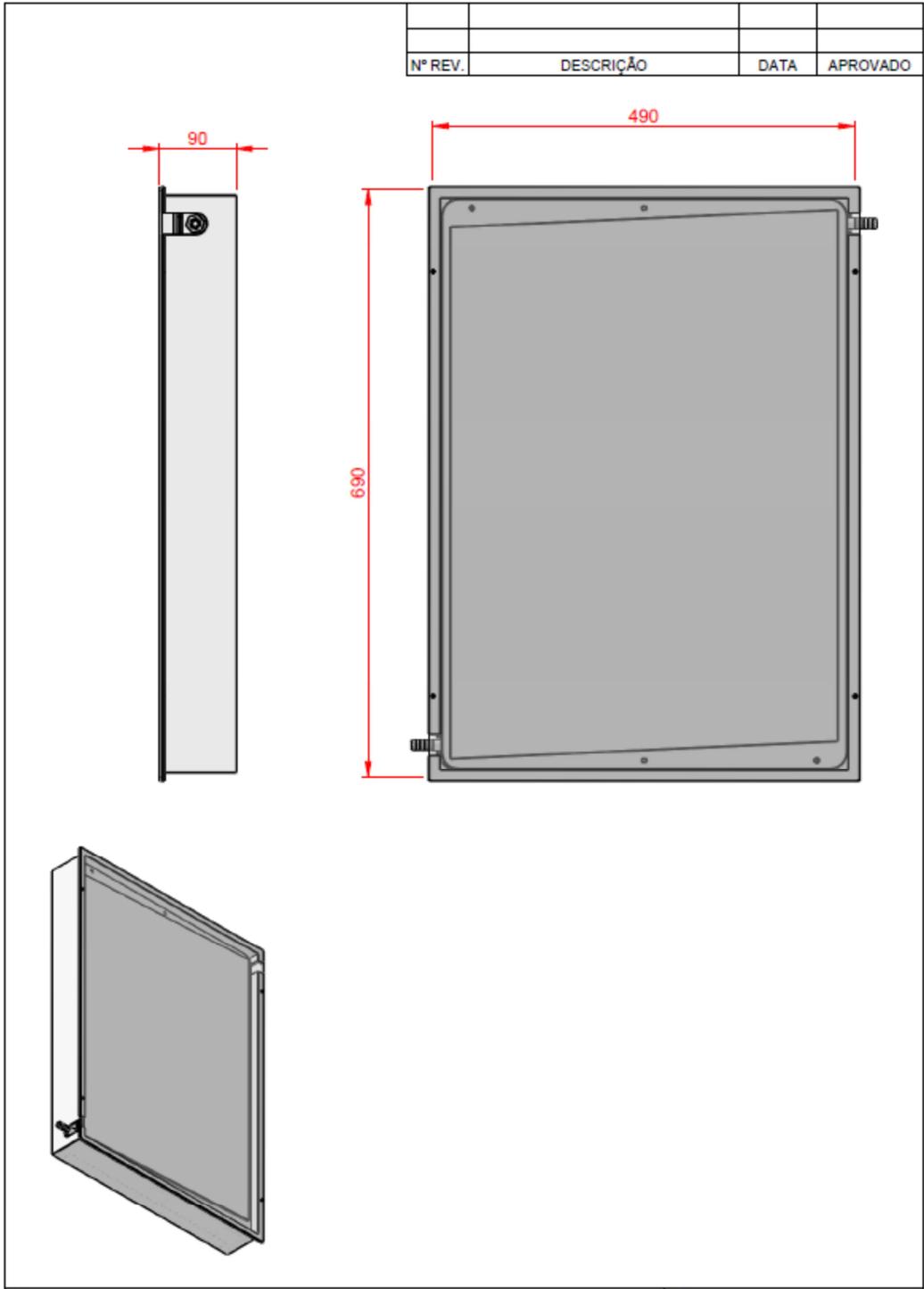
VAN NIEKERK, W.M.K., **Performance modelling of a parallel tube polymer absorber**. Solar Energy, Vol. 58, No. 1-3, pp. 39-44. 1996.

YIQIN, Y, HOLLANDS, K. G. T., BRUNGER, A. P., **Measured Top Heat Loss Coefficients for Flat Plate Collectors with Inner Teflon Covers**, Proceedings of the

Biennial. Congress of the International Solar Energy Society, Denver, Colorado, USA,1991,  
p. 1200.

APÊNDICE A – PROJETO DO COLETOR SOLAR POLIMÉRICO





## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS DADOS COLETADOS

$T_i$ (°C)	$T_o$ (°C)	$T_{m,p}$ (°C)	$(T_m - T_a)/G_T$ (m <sup>2</sup> C/W)	$\eta_b$ (%)
20,6	24,6	63,4	0,0016	47,3
21,5	25,3	64,1	0,0017	45,1
22,6	25,7	62,3	0,0028	40,2
23,4	26,8	66,7	0,0034	44,0
24,5	28,3	75,4	0,0041	51,9
25,6	29,4	74,1	0,0049	53,5
26,5	29,4	82,2	0,0052	36,8
27,5	29,4	79,9	0,0039	24,4
28,5	30,5	76,5	0,0035	27,3
29,5	31,2	63,0	0,0059	24,2
30,6	33,2	75,8	0,0037	37,2
31,3	33,7	86,0	0,0067	38,7
32,3	35,1	63,4	0,0050	43,0
38,0	41,0	51,1	0,0156	44,9
38,5	41,5	53,6	0,0161	42,9
39,7	42,8	54,4	0,0168	44,3
40,5	44,0	53,5	0,0182	38,2
41,3	43,9	53,0	0,0182	36,5
42,5	44,8	54,2	0,0189	30,6
43,5	46,6	54,1	0,0201	35,0
44,4	46,8	5,8	0,0200	32,2
45,6	48,6	57,2	0,0187	36,8
46,6	49,4	56,0	0,0198	35,8
47,5	50,8	56,0	0,0193	42,1
48,5	52,0	56,0	0,0205	44,3
49,5	52,7	58,0	0,0216	41,3
50,5	53,9	59,0	0,0240	43,2
51,4	54,5	61,0	0,0248	39,4
52,5	54,8	62,0	0,0264	29,1
53,5	56,0	63,0	0,0275	32,4
54,5	56,7	65,0	0,0280	28,0
56,3	59,6	75,0	0,0301	42,2
60,5	63,9	77,0	0,0315	40,9
61,5	64,4	77,0	0,0322	34,3