

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Janos Franzner da Silva

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES
POLIMÉRICOS DE COBERTURA SEMITRANSARENTE**

Florianópolis

2014

Janos Franzner da Silva

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES
POLIMÉRICOS DE COBERTURA SEMITRANSARENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Colle

Florianópolis

março/2014

Da Silva, Janos Franzner

Caracterização Numérico-Experimental do Desempenho
Térmico de Coletores Solares Poliméricos de Cobertura
Semitransparente / Janos Franzner Da Silva ; orientador,
Sergio Colle - Florianópolis, SC, 2014.

161 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Solar. 3. Coletor
Solar Térmico. 4. Duopolimérico. 5. Polimérico. I. Colle,
Sergio. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Janos Franzner da Silva

**CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE COLETORES SOLARES
POLIMÉRICOS DE COBERTURA SEMITRANSARENTE**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de março de 2014

Prof. Sergio Colle, D.Sc.
Orientador

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.
UFSC

Prof. Saulo Güths, Dr.
UFSC

Prof. Samuel Luna de Abreu, Dr.
IFSC

Para **Emílio e Márcia**, meus pais,
pelo amor, suporte e exemplo

Para **Larissa**, minha irmã
pela companhia e fraternal cumplicidade

Para **Juliana**,
pelo carinho, presença e compreensão

Agradecimentos

À Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades que sempre me proporcionou.

Aos meus pais, Emílio e Márcia, por todo amor e carinho, aliados à excelente educação e formação; frutos de sua dedicação e esforço. E à minha irmã, Larissa, por compartilhar comigo de momentos, experiências e conhecimentos.

À minha namorada, Juliana Pires, por estar sempre presente, compreender-me e me motivar a ir em frente.

À minha avó, Onilda (ou, carinhosamente, Dida) e meu avô Emílio, por hospedarem-me em seu hotel 5 estrelas – digo, residência – e, principalmente, pelas palavras de motivação.

Ao Prof. Sergio Colle, pela orientação desafiadora, que propiciou-me crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Aos membros da Banca Examinadora, pela disposição em avaliar este trabalho e pelas contribuições que, com certeza, contribuíram para o mesmo.

Ao LEPTEN/LabSolar e todos os seus integrantes, pela infraestrutura, apoio e companhia, especialmente aos amigos Allan Ricardo Starke, Carlos Javier Noriega Sánchez e Júlio Nelson Scussel e aos colegas Luigi Antônio de Araújo Passos, Rosângela Avi de Sousa, Carolina Maria Coelho, Rubinei Dorneles Machado, Guilherme Lima Gonçalves, Henrique Carminatti, Maycon Sérgio Macedo, Gustavo Marques Hobold, Allan Ricardo Sparemberger, Vinícius Kramer Scariot e Igor Luz Grams.

Aos amigos Bruno Terêncio do Vale, Ricardo D’Agnoluzzo Brancher e Elias Gava Colombo pelas manhãs, tardes e noites de estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, seu

corpo administrativo e docente, pelo zelo e esforço dispendidos na realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa acadêmica concedida durante a realização deste trabalho.

À empresa DESA - Dobrevê Energia S.A., em especial Antônio Curioni, pelo apoio e incentivo concedidos.

À empresa Irmãos Fischer S.A. pelo suporte financeiro para a fabricação do protótipo do coletor solar duopolimérico e seu teste no LEPTEN/LabSolar.

A todos que, de alguma forma, colaboraram para a conclusão deste trabalho.

"Seja quem você for. Seja qualquer posição que você tenha na vida, um nível altíssimo ou mais baixo, social. Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus que um dia você chega lá. De alguma maneira, você chega lá."

Ayrton Senna da Silva

Sumário

Lista de Figuras	p. xvii
Lista de Tabelas	p. xxi
Resumo	p. xxiii
Abstract	p. xxv
Lista de símbolos	p. xxvii
1 Introdução	p. 1
1.1 Energia: consumo, geração e suas implicações	p. 1
1.2 Energia solar	p. 4
1.3 Objetivo do trabalho	p. 5
1.4 Organização do texto	p. 7
2 Revisão Bibliográfica	p. 9
3 Modelos Matemáticos para Simulação Numérica	p. 23
3.1 Visão geral	p. 23
3.2 Radiação solar	p. 25
3.2.1 As componentes da radiação	p. 25
3.2.2 Geometria solar	p. 26
3.2.3 Polímero semitransparente	p. 29
3.2.4 Água	p. 36
3.2.5 Polímero opaco	p. 39
3.2.6 Método da radiação líquida	p. 41
3.3 Condução	p. 45
3.3.1 Polímeros semitransparente e opaco	p. 45
3.3.2 Água	p. 46
3.4 Advecção	p. 46
3.4.1 Água	p. 46
3.5 Convecção	p. 47
3.5.1 Água	p. 47
3.5.2 Vento	p. 49
3.5.3 Ambiente	p. 51

3.6	Radiação térmica	p. 52
3.6.1	Temperatura do céu	p. 54
3.6.2	Polímero opaco	p. 55
3.7	Comentários finais	p. 56
4	Simulação Numérica	p. 57
4.1	Dados de entrada	p. 57
4.2	Procedimento de simulação	p. 59
4.3	Ferramenta e métodos computacionais	p. 61
4.4	Erros de origem numérica	p. 64
5	Ensaio Experimental	p. 71
5.1	Protótipo	p. 71
5.2	Equipamentos	p. 72
5.3	Procedimentos de ensaio	p. 74
5.4	Tratamento dos dados	p. 76
5.5	Regressão	p. 77
5.6	Resultados	p. 81
5.7	Comparação com o modelo numérico	p. 86
6	Análises de Sensibilidade	p. 93
6.1	Considerações preliminares	p. 93
6.2	Dimensões do canal	p. 97
6.3	Condutividade térmica do polímero semitransparente	p. 101
6.4	Condutividade térmica do polímero opaco	p. 104
6.5	Espessura óptica solar do polímero semitransparente	p. 106
6.6	Espessura óptica térmica do polímero semitransparente	p. 109
6.7	Espessura do polímero semitransparente	p. 111
6.8	Configuração pré-otimizada	p. 113
6.9	Considerações finais	p. 116
7	Conclusões	p. 119
7.1	Sugestões para próximos trabalhos	p. 120
	Referências Bibliográficas	p. 123
	Apêndice A – Discretização da Primeira Lei da Termodinâmica	p. 129
A.1	Tipo 1	p. 129
A.2	Tipo 2	p. 130
A.3	Tipo 3	p. 130
A.4	Tipo 4	p. 131

A.5 Tipo 5	p. 131
A.6 Tipo 6	p. 132
A.7 Tipo 7	p. 132
A.8 Tipo 8	p. 132
Apêndice B – Equação da Intensidade Média de Radiação Incidente	p. 135
Apêndice C – Equação do Fluxo Radiativo	p. 143
Apêndice D – Dados de Entrada para o Ambiente Numérico	p. 151
D.1 Geometria	p. 151
D.2 Propriedades dos materiais	p. 152
D.3 Condições de operação	p. 152
Apêndice E – Dados Qualificados para a Regressão	p. 157

Lista de Figuras

1.1	Matriz mundial de geração de energia primária para o ano de 2011. Fonte: IEA (2013).	p.2
1.2	Matriz mundial de geração de eletricidade, em 2011. Fonte: IEA (2013).	p.3
1.3	Evolução cronológica de coletores instalados, em área, no Brasil. Fonte: Mauthner e Weiss (2013); à exceção de dados com superscrito *, os quais: DASOL-ABRAVA (2013).	p.6
1.4	Comparação das configurações de coletores solares poliméricos convencional e duopolimérico.	p.7
2.1	Ilustração da primeira proposta de Harris e colaboradores. Adaptado de Harris <i>et al.</i> (1965).	p.10
2.2	Ilustração da proposta final de Harris e colaboradores. Adaptado de Harris <i>et al.</i> (1965).	p.10
2.3	Foto do coletor solar testado por Khanna (1973). Retirado de Khanna (1973).	p.11
2.4	Ilustração do coletor solar testado por Kudish e Wolf (1978). Adaptado de Kudish e Wolf (1978).	p.12
2.5	Ilustração do coletor solar analisado por Sodha <i>et al.</i> (1981). Adaptado de Sodha <i>et al.</i> (1981).	p.13
2.6	Ilustração do coletor solar testado por Abdelsalam (1984). Adaptado de Abdelsalam (1984).	p.14
2.7	Ilustração do coletor solar testado por Sodha <i>et al.</i> (1985). Adaptado de Sodha <i>et al.</i> (1985).	p.15
2.8	Ilustração de um dos coletores solares modelados por Kishore <i>et al.</i> (1986). Adaptado de Kishore <i>et al.</i> (1986).	p.17
2.9	Ilustração do coletor solar modelado por González <i>et al.</i> (1992). Adaptado de González <i>et al.</i> (1992).	p.18
2.10	Ilustração do coletor solar analisado por Tsilingiris (1997). Adaptado de Tsilingiris (1997).	p.20

2.11	Ilustração do coletor solar estudado por Janjai <i>et al.</i> (2000), onde: (1) cobertura de plástico, (2) camada superior transparente da bolsa d'água, (3) água, (4) camada inferior opaca da bolsa d'água, (5) isolamento térmico de fundo, (6) isolamento térmico lateral, e (7) estrutura de metal. Adaptado de Janjai <i>et al.</i> (2000).	p. 21
2.12	Ilustração do coletor solar modelado por Tsilingiris (2002). Adaptado de Tsilingiris (2002).	p. 22
3.1	Domínio de resolução proposto, juntamente com seus canais adjacentes.	p. 25
3.2	Dimensões do coletor.	p. 26
3.3	Seção do coletor solar e uma ilustração de sua malha.	p. 27
3.4	Ilustração dos ângulos entre um raio solar (radiação direta) e uma superfície inclinada. Retirado de Duffie e Beckman (2013).	p. 28
3.5	Ilustração do fenômeno da refração.	p. 31
3.6	Transmitância de uma camada de água ($\tau_{\text{água}}$) em função de sua espessura ($X_{\text{água}}$).	p. 38
3.7	Razão da absorptância solar (α) e da absorptância solar em incidência normal (α_n) para uma superfície preta plana.	p. 41
3.8	Ilustração do conceito da condição de contorno de superfície especular.	p. 45
3.9	Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade do vento.	p. 50
4.1	Fluxograma do procedimento de simulação numérica.	p. 62
5.1	Protótipo do coletor solar duopolimérico durante o ensaio experimental na bancada do LEPTEN/LabSolar.	p. 73
5.2	Esquema da bancada do LEPTEN/LabSolar utilizada para os ensaios experimentais do protótipo do coletor solar duopolimérico.	p. 75
5.3	Fatores de correção, K_b , em função do ângulo de incidência para várias configurações de coletor solar. Adaptado de Perers (1997).	p. 83
5.4	Curvas de desempenho térmico para os modelos linear e quadráticos obtidas experimentalmente.	p. 85
5.5	Curva de desempenho térmico obtida experimentalmente para o modelo linear (em vermelho) com intervalo de confiança de 95% (em verde).	p. 87

5.6	Curva de desempenho térmico obtida experimentalmente para o modelo quadrático (em vermelho) com intervalo de confiança de 95% (em verde).	p. 88
5.7	Curvas de desempenho térmico obtidas numericamente para os modelos linear e quadrático.	p. 89
5.8	Curva de desempenho térmico obtida numericamente (em vermelho), juntamente com os limites do intervalo de confiança de 95% da obtida experimentalmente (em verde), para o modelo linear.	p. 90
5.9	Curva de desempenho térmico obtida numericamente (em vermelho), juntamente com os limites do intervalo de confiança de 95% da obtida experimentalmente (em verde), para o modelo quadrático.	p. 90
6.1	Ilustração dos modos de transferência de calor do coletor solar duopolimérico.	p. 94
6.2	Participação dos modos de transferência de calor na perda de calor total do coletor solar.	p. 96
6.3	Efeito da altura do canal nas curvas de desempenho.	p. 97
6.4	Efeito da largura do canal nas curvas de desempenho.	p. 99
6.5	Perda de calor por radiação do topo das nervuras em função da largura do canal.	p. 100
6.6	Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente nas curvas de desempenho.	p. 102
6.7	Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente na perda por convecção na superfície superior.	p. 103
6.8	Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente na perda por radiação do polímero semitransparente.	p. 104
6.9	Efeito da condutância térmica do polímero opaco na curva de desempenho.	p. 105
6.10	Efeito da condutância térmica do polímero opaco na perda por convecção na superfície inferior.	p. 107
6.11	Efeito da condutância térmica do polímero opaco na respectiva perda por radiação.	p. 107
6.12	Efeito da espessura óptica solar na curva de desempenho.	p. 108
6.13	Efeito da espessura óptica térmica na curva de desempenho.	p. 110
6.14	Efeito da espessura do polímero semitransparente na curva de desempenho.	p. 112

- 6.15 Curvas de desempenho obtidas numericamente de uma configuração pré-otimizada para os modelos quadrático e linear. p.114
- 6.16 Curvas de desempenho obtidas numericamente das configurações de referência e pré-otimizada para o modelo quadrático. p.115
- 6.17 Curvas de desempenho para os coletores solares dupolimérico e seus concorrentes: polimérico e vidro-metálico. p.117
- B.1 Sistema de coordenadas e limites de integração para a equação da intensidade média de radiação incidente. p.137
- C.1 Sistema de coordenadas e limites de integração para a equação do fluxo radiativo. p.146
- E.1 Relação entre fração difusa e irradiância global. p.158
- E.2 Relação entre irradiância difusa e direta. p.158
- E.3 Relação entre irradiância global e diferença de temperatura de saída e entrada da água. p.159
- E.4 Relação entre irradiância global e velocidade do vento. p.159
- E.5 Relação entre irradiância direto e ângulo de incidência. p.160
- E.6 Relação entre temperatura ambiente e irradiância global.p.160
- E.7 Relação entre o ganho de temperatura da água e a temperatura da água na entrada do coletor. p.161

Lista de Tabelas

4.1	Dados de entrada para a simulação.	p. 58
4.2	Parâmetros da análise.	p. 65
4.3	Análise de erros numéricos advindos do critério de convergência entre as iterações.	p. 66
4.4	Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo x	p. 67
4.5	Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo y	p. 67
4.6	Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo z	p. 68
4.7	Comparação de parâmetros entre o caso base e o caso aprimorado.	p. 69
4.8	Erros numéricos para o caso aprimorado.	p. 69
5.1	Restrições de condições de operação para os procedimentos de ensaio.	p. 74
5.2	Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente.	p. 82
5.3	Dados de entrada para a curva normalizada de desempenho.	p. 84
5.4	Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente para o modelo linear com intervalo de confiança de 95%.	p. 86
5.5	Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente para o modelo quadrático com intervalo de confiança de 95%.	p. 87
5.6	Parâmetros de desempenho térmico obtidos numericamente.	p. 89
6.1	Participação mínima e máxima dos modos de transferência na perda de calor total do coletor solar em diferentes condições de operação.	p. 95
6.2	Efeito da altura do canal nos parâmetros de desempenho.	p. 98
6.3	Efeito da largura do canal nos parâmetros de desempenho.	p. 99

6.4	Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente nos parâmetros de desempenho.	p.102
6.5	Efeito da condutância térmica do polímero opaco nos parâmetros de desempenho.	p.106
6.6	Efeito da espessura óptica solar nos parâmetros de desempenho.	p.108
6.7	Efeito da espessura óptica térmica nos parâmetros de desempenho.	p.110
6.8	Efeito da espessura do polímero semitransparente nos parâmetros de desempenho.	p.112
6.9	Parâmetros de desempenho obtidos numericamente de uma configuração pré-otimizada para os modelos quadrático e linear.	p.114
6.10	Parâmetros de desempenho obtidos numericamente das configurações de referência e pré-otimizada para os modelos quadrático e linear.	p.116
D.1	Dimensões do caso de referência.	p.151
D.2	Propriedades dos materiais utilizadas nas simulações numéricas.	p.153
D.3	Dados de entrada para as simulações numéricas.	p.154
D.4	Dados de entrada para as simulações numéricas. (<i>continuação</i>)	p.155

Resumo

O uso de coletores solares é uma forma limpa e econômica de aquecer água para variados fins; prova disto é o crescente mercado mundial. Neste contexto, vê-se no mercado brasileiro, principalmente nos últimos 5 anos, o surgimento de um concorrente para os coletores solares de placa plana vidro-metálicos: os coletores solares poliméricos. Estes são constituídos de polímeros opacos e negros que absorvem a radiação solar e transferem esse calor à água por um processo de condução seguida de convecção. Como os polímeros, comumente, apresentam baixa condutividade térmica, há uma dificuldade inerente no desempenho destes, e, devido à esta limitação de desempenho, os coletores poliméricos acabam restringindo-se a aplicações de baixa temperatura. Visando alterar este panorama, propõe-se uma configuração alternativa para os mesmos, qual seja, a substituição da camada superior opaca por uma semitransparente, proposta esta batizada de coletor solar duopolimérico, e que se aproveita da baixa condutividade térmica dos polímeros. Com o intuito de entender as potencialidades dos coletores solares duopoliméricos, o presente trabalho: (i) apresenta um inventário de modelos matemáticos que representam os fenômenos físicos envolvidos, (ii) elabora um algoritmo computacional para a obtenção do perfil térmico do coletor solar e a sua curva de desempenho, (iii) realiza um ensaio experimental a fim de validar os resultados obtidos numericamente e (iv) conduz análises de sensibilidade para uma gama de variáveis visando aumentar o desempenho térmico do coletor solar. Por meio dos resultados, conclui-se que o coletor solar duopolimérico supera a curva de desempenho de coletores solares poliméricos tradicionais, aproximando-se do desempenho de coletores solares de placa plana vidro-metálicos. Por fim, algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas, com as quais acredita-se aprimorar ainda mais a curva de desempenho dos coletores solares duopoliméricos.

Palavras-chave: energia solar; coletor solar térmico; duopolimérico; polimérico.

Abstract

Solar thermal collectors are a clean and economical mean of heating water for different purposes; proof of that is the growing global market. In this context, specially in the last 5 years, emerges a competitor for the traditional flat plate collectors in the Brazilian market: polymeric collectors. These collectors are made of opaque and black polymers that absorb solar radiation and transfer the referred heat to water through a process of conduction followed by convection. As polymers generally have low thermal conductivity, there is an intrinsic difficulty in their performance, and because of this performance limitation, the application of polymeric solar collectors narrows to low temperature only. Aiming to change this panorama, a new configuration for these collectors is proposed, which is the substitution of the opaque upper layer for a semitransparent one; this proposal, named as duopolymeric solar collector, takes advantage of the low thermal conductivity of polymers. In order to understand the potential of duopolymeric solar collectors, this work: (i) presents an inventory of mathematical models that represent the involved physical phenomena, (ii) elaborates a computational algorithm to obtain the thermal profile of the solar collector and its thermal performance curve, (iii) executes experimental testing of a prototype for the purpose of validation of the results obtained numerically, (iv) leads to a sensitivity analysis for a range of variables targeting to increase the thermal performance of the solar collector. By means of the results, it is concluded that the duopolymeric solar collector surpasses the thermal performance curve of conventional polymeric solar collectors, approaching the performance of flat plate solar collectors. Finally, some suggestions for future works are made, which are believed to improve even more the thermal performance curve of duopolymeric solar collectors.

Keywords: solar energy; solar thermal collector; duopolymeric; polymeric.

Lista de símbolos

Alfabeto Romano

A	Área	[m ²]
a	Vetor dos parâmetros de desempenho	
a	Menor dimensão do duto retangular	[m]
B	Variável auxiliar	[-]
b	Maior dimensão do duto retangular	[m]
C	Matriz auxiliar	
D	Diâmetro	[m]
c_p	Calor específico	[J/(kg K)]
E	Poder emissivo	[W/m ²]
F	Fator de forma	[-]
f	Fração em relação à radiação global	[-]
$F_R(\tau\alpha)$	Parâmetro de ganho de calor	[-]
$F_R U_L$	Parâmetro linear de perda de calor	[W/(m ² K)]
$F_R U_{L,T}$	Parâmetro quadrático de perda de calor	[W/(m ² K ²)]
G	Fluxo radiativo	[W/m ²]
G	Irradiância solar global, se sem subscrito	[W/m ²]
g	Constante gravitacional	[m/s ²]
H	Hora solar	[-]
h	Coefficiente de transf. de calor por convecção	[W/(m ² K)]
I	Intensidade de radiação	[W/(m ² sr)]
\hat{I}	Função fonte	[W/m ²]
IC	Intervalo de confiança	[-]
K	Coefficiente de correção (ângulo de incidência)	[-]
k	Coefficiente de extinção	[1/m]
k	Condutividade térmica	[W/(m K)]
L	Espessura óptica	[-]
m	Massa	[kg]
mC	Capacitância térmica	[J/(m ² K)]
N	Dia do ano	[-]
Nu	Número de Nusselt	[-]

n	Índice de refração real	[-]
n	Número de pontos utilizados para a regressão	[-]
P	Pressão	[Pa]
p	Número de parâmetros do modelo de regressão	[-]
q	Calor	[W]
\mathbf{q}	Vetor calor	[W]
r	Variável de integração	[m]
\mathbf{r}	Vetor posição	[m]
R	Raio de integração	[m]
R_a	Número de Rayleigh	[-]
S	Distância	[-]
SSE	Soma do quadrado dos resíduos da regressão	[-]
\mathbf{s}	Vetor de direção unitário	[-]
T	Temperatura	[°C ou K]
t	Tempo	[s]
t	Transmitância	[-]
t	Coefficiente de Student	[-]
v	Velocidade	[m/s]
V	Velocidade do vento	[m/s]
V	Volume	[m ³]
\mathbf{W}	Matriz de ponderação	[-]
X	Espessura da camada de água	[m]
\mathbf{X}	Matriz das variáveis de entrada (independentes)	
\mathbf{x}_0	Vetor das variáveis de entrada de um ponto	
\mathbf{y}	Vetor da variável de saída (dependente)	[-]

Alfabeto Grego

α	Absortância	[-]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
β	Coefficiente de expansão térmica	[1/K]
β	Ângulo de inclinação da superfície	[°]
β	Coefficiente de atenuação	[1/m]
χ	Ângulo de refração	[° ou rad]
δ	Declinação da trajetória solar	[° ou rad]
ϵ	Emitância	[-]
η	Eficiência do coletor solar	[-]
η	Largura adimensionalizada	[-]

γ	Ângulo de azimute da superfície	[° ou rad]
κ	Coefficiente de absorção	[1/m]
λ	Comprimento de onda	[m]
μ	Viscosidade absoluta (ou dinâmica)	[Pa s]
ν	Difusividade de quantidade de movimento	[m ² /s]
ω	Ângulo horário	[° ou rad]
ω	Albedo de dispersão	[-]
Φ	Dissipação viscosa	[W/(m ³ Pa s)]
Φ	Função fase de dispersão	[-]
ϕ	Latitude da localidade	[° ou rad]
ϕ	Ângulo de integração	[° ou rad]
π	Constante matemática	[-]
ψ	Ângulo de refração	[° ou rad]
ρ	Densidade ou massa específica	[kg/m ³]
ρ	Refletância	[-]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/(m ² K ⁴)]
σ_d	Coefficiente de dispersão	[-]
$\hat{\sigma}$	Variância	[-]
τ	Transmitância	[-]
θ	Ângulo de incidência da radiação direta	[° ou rad]
ζ	Altura adimensionalizada	[-]

Subscrito

0	Nível do mar
0	Localizado em fronteira
λ	Dependência espectral
*	Localizado no interior do meio
agua	Água ou camada d'água
amb	Referente ao ambiente
b	Por radiação direta
c	Por condução
céu	Hemisfério celeste
conv	Convecção (perda de calor por)
d	Por radiação difusa
dir	Radiação direta
dif	Radiação difusa
e	Efetivo(a)

ent	Entrada
h	Hidráulico (diâmetro)
inf	Superfície inferior
m	Médio(a)
nerv	Superfície do topo das nervuras
po	Ponto de orvalho
r	Por radiação
rad	Radiação (perda de calor por)
ref	Referência (temperatura de)
s	Solar (ângulo de azimute)
S	Radiação solar
sai	Saída
sup	Superfície superior
st	Polímero semitransparente
T	Radiação térmica
util	Útil (calor)
z	Zênite (ângulo de incidência de)

Superscrito

"	Por unidade de área	[1/m ²]
'''	Por unidade de volume	[1/m ³]
.	Por unidade de tempo	[s]

1 Introdução

Energia é um conceito metafísico que denota alcançar um propósito específico por meio do consumo desta. Por exemplo, nós, os seres humanos, ingerimos alimentos que, após serem digeridos por nosso organismo, nos possibilitam as mais diversas atividades: respirar, caminhar e pensar.

Apesar de extremamente abstrato, o conceito de energia está enraizado em nossa sociedade, sendo facilmente exposto nas mais diversas ocasiões, assim como presente nas mais rotineiras conversas. Além de nossa alimentação – nossa necessidade básica de energia – temos um sistema complexo de usinas, redes de transmissão, subestações, redes de distribuição e incontáveis equipamentos para que, no conforto do nosso lar, possamos acender uma luz ou ligar um condicionador de ar. Da mesma forma, estruturas imensas são construídas em alto-mar para que possamos encher o tanque de nosso automóvel e usufruirmos da independência que nos traz a mobilidade.

Pela leitura do parágrafo anterior, fica claro que o ser humano não é somente mais um no meio ambiente em que ele se insere. Os animais – ditos irracionais – buscam satisfazer somente uma necessidade energética: a da alimentação. Já o ser humano é um consumidor de energia muito mais voraz.

1.1 Energia: consumo, geração e suas implicações

É de conhecimento geral que um ser humano adulto e do sexo masculino necessita ingerir de 2.000 a 2.500 kcal diariamente para que possa meramente sobreviver sem acúmulos de energia (que acontecem na forma de gordura). Caso este valor seja transformado em uma potência média, vê-se que o consumo do corpo humano se situa entre 95 W e 120 W; uma mera lâmpada incandescente.

Somente em 2011, o mundo consumiu de energia primária um

total de 8.918 Mtoe (IEA, 2013) – o que equivale a cerca de 37,3 EJ¹. Essa quantidade enorme de energia significa um consumo *per capita* de 53,7 GJ, ou, aplicando a mesma transformação da seção anterior, cada pessoa equivale ao consumo de uma potência média de 1,7 kW. Isto é, o ser humano consome cerca de 14 vezes além de sua necessidade energética de sobrevivência.

A rigor, o problema não está no consumo da energia em si, mas na forma como esta energia é gerada. Pode-se ver pela figura 1.1 a maneira como a energia atual é gerada: 66,4 % da energia primária consumida mundial é advinda diretamente de fontes fósseis (IEA, 2013). Ainda, dentro da fatia correspondente a eletricidade, também há uma parcela que é vinda de fontes fósseis. Com este propósito, a figura 1.2 mostra a matriz mundial de geração de eletricidade. Somando as participações das fontes fósseis na geração de energia elétrica, chega-se a um total de 68 % (IEA, 2013). Em suma, atualmente, praticamente 78,5 % de toda a energia disponível no planeta vêm da queima de combustíveis fósseis.

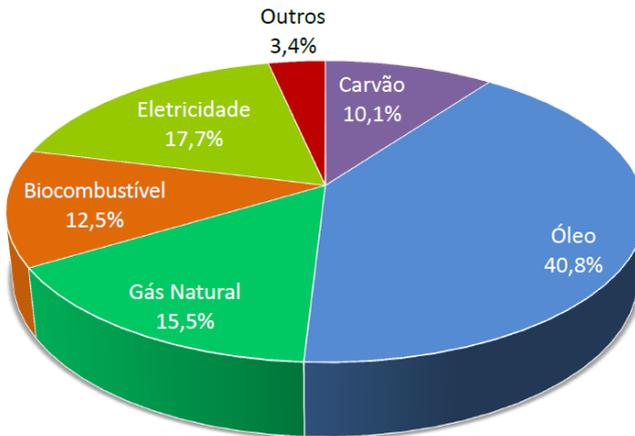


Figura 1.1: Matriz mundial de geração de energia primária para o ano de 2011.
Fonte: IEA (2013).

Sabe-se que a queima de combustíveis fósseis libera, entre outros gases, o dióxido de carbono, CO₂, um dos grandes causadores do chamado efeito estufa. Este efeito nada mais é que o bloqueio da radiação térmica que, normalmente, deixaria o planeta. Fazendo uma analogia com um coletor solar, como veremos adiante, significa aumentar a espessura óptica para radiação térmica da atmosfera. O resultado é

¹Exajoule, equivalente a 10¹⁸J.

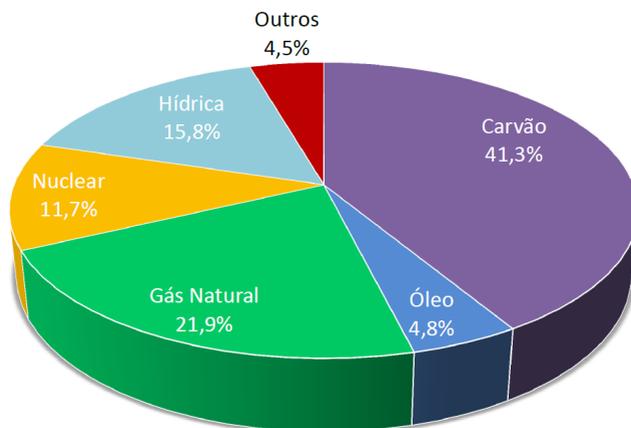


Figura 1.2: Matriz mundial de geração de eletricidade, em 2011. Fonte: IEA (2013).

o aquecimento generalizado da matéria que se encontra abaixo desta camada – a mesma que emite a radiação térmica – e que, neste caso, é o globo terrestre. Para se ter uma ideia, em 2011, a emissão de CO_2 por queima de combustíveis fósseis somou um valor de 4,5 t *per capita* (IEA, 2013).

Esta emissão exacerbada preocupa habitantes do mundo inteiro. Por este motivo, estabeleceu-se, desde 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), formado por cientistas e colaboradores do mundo inteiro. O IPCC examina a literatura existente, realiza uma análise criteriosa e, com estas, publica periodicamente relatórios abordando as mudanças climáticas antropogênicas, os seus impactos e as opções para adaptação e/ou mitigação decorrentes destes.

Em seu último relatório, o IPCC afirma, com 95 % de certeza, que as atividades humanas são as principais causadoras do aquecimento global desde a década de 1950; em especial, está a queima de combustíveis fósseis (IPCC, 2013). Projeções são feitas em cenários otimistas, base e pessimistas, mostrando que a temperatura média terrestre pode ser elevada entre 0,3 e 4,8 °C até o fim deste século. Um destes efeitos é a elevação nível do mar entre 29 e 82 cm, fazendo com que áreas sejam permanentemente submersas, inclusive algumas habitadas. Outro efeito é o processo de acidificação dos oceanos, que ocorre pela absorção do CO_2 presente na atmosfera por estes, podendo alterar o bioma marinho e, deste modo, afetar toda a cadeia alimentar. Isso sem contar o efeito extremo do aumento da poluição do ar sobre a saúde humana.

Resumindo, o modelo atual de geração e consumo de energia é, sem dúvidas, insustentável e é quase certo que as consequências deste ainda estão por vir.

1.2 Energia solar

Em meio a este contexto de modelo insustentável de geração e consumo de energia está a energia solar. Este tipo de energia, como o próprio nome diz, é a energia vinda diretamente do Sol já que, de certa forma, a grande maioria das fontes de energia conhecidas são vindas indiretamente do Sol. A formação dos combustíveis fósseis se deu quando matéria orgânica foi submetida a altíssimas temperaturas e pressões; esta matéria orgânica é fruto da sintetização de glicose por seres vivos clorofilados que, quando expostos a radiação solar, consomem água e CO₂ para este fim. O vento, além de resultado dos movimentos de rotação da Terra, também é causado pelo aquecimento desigual de regiões do globo, formando regiões de alta e baixa pressão; o aquecimento, naturalmente, é pela radiação solar. Por fim, o fluxo contínuo de um rio é resultado do ciclo da água, cujo grande contribuidor é o calor do Sol.

As formas de energia solar mais aplicadas na atualidade, são: térmica, fotovoltaica e heliotérmica. Todas estas são classificadas como energias renováveis e limpas; renováveis, uma vez que a sua fonte é inesgotável, e limpas, porque, via de regra, estas não emitem gases poluentes em sua operação, somente em sua produção.

Das três, focar-se-á na energia solar térmica. Este tipo de energia é responsável pelo aquecimento de fluidos desde temperaturas baixas – cerca de 20 °C – até temperaturas da ordem de 100 °C, e a posterior utilização da energia térmica (calor) destes fluidos, seja para fins recreativos, domésticos ou industriais. Vale ressaltar que as emissões do processo de produção de equipamentos de geração de energia solar são rapidamente compensadas em sua fase de operação (IEA, 2012), fazendo com que o balanço geral de emissões na vida útil dos mesmos seja negativo.

Segundo Mauthner e Weiss (2013), ao final de 2011, havia uma área de 335,1 milhões de m² de coletores solares para aquecimento de água operando em 56 diferentes países. Estes sistemas foram responsáveis pela geração de 704 PJ² de energia térmica, o que evitou a emissão de 64,1 milhões de toneladas de CO₂³, isto é, uma média de 0,2 toneladas

²Petajoule, equivalente a 10¹⁵J.

³Segundo Boden e Andres (2013), emitiu-se 33,6 bilhões de toneladas de CO₂ no ano

de emissão de CO₂ são evitadas anualmente por cada m² de coletores solares em operação. Neste sentido, a afirmativa de que sistemas de aquecimento solar são fonte de energia térmica limpa é endossada.

O Brasil, ao final de 2011, era o quinto país em termos de área instalada de coletores solares, com um valor em torno de 7 milhões de m². Todavia, este número era somente a metade da área instalada pelo quarto lugar, a Turquia, com 14,5 milhões de m², e representava menos de 5% da área instalada pelo primeiro lugar, a China, que somava 217,4 milhões de m².

De qualquer maneira, o mercado brasileiro vem mantendo um crescimento saudável nos últimos dez anos, com uma taxa composta de crescimento anual de cerca de 17%. A figura 1.3 mostra a evolução deste mercado desde o ano de 2001 até 2012, dividindo este crescimento em dois tipos de coletores solares: com e sem cobertura. Basicamente, os coletores com cobertura são os tradicionais coletores de placa plana vidro-metálicos, e os sem cobertura são os coletores de materiais poliméricos, geralmente opacos e negros. Vê-se que a participação de coletores sem cobertura no mercado brasileiro vem aumentando constantemente, haja vista, principalmente, o seu menor custo. No entanto, estes limitam-se a aplicações de baixa temperatura, dentre as quais a mais típica é o aquecimento de piscinas.

O trabalho em questão abordará este tipo de coletor, mas em uma configuração diferente da usual.

1.3 Objetivo do trabalho

Como dito, os coletores solares poliméricos tradicionais são constituídos exclusivamente por polímeros opacos e negros, responsáveis pela absorção da radiação solar. Neste sentido, a radiação solar esquentará a superfície superior, e que está exposta diretamente ao ambiente, e através de condução pelo próprio polímero este calor é transferido por convecção à água que está circulando em canais. Percebe-se que o desempenho deste coletor é uma função dos potenciais (facilidade) de transferência de calor de dois caminhos que este pode seguir após ser absorvido pelo polímero opaco: convecção paralelamente com radiação para o ambiente, ou condução seguido de convecção para a água. Como os polímeros, comumente, possuem baixa condutividade térmica, pode-se concordar que há uma dificuldade inerente no aumento do desempenho destes. Com este intuito, tem-se que

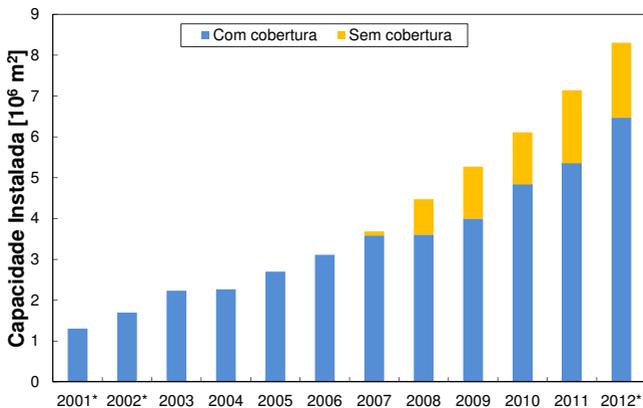


Figura 1.3: Evolução cronológica de coletores instalados, em área, no Brasil.

Fonte: Mauthner e Weiss (2013); à exceção de dados com superscrito *, os quais: DASOL-ABRAVA (2013).

a primeira abordagem é a redução da espessura da camada do polímero, a qual já é bastante explorada; e a segunda é o aumento da condutividade térmica do polímero através de uma série de aditivos, o que significa um aumento nos custos de produção destes. Enfim, as perspectivas para este tipo de coletor aparentam bastante limitadas.

Visando contornar estas constatações, ao mesmo tempo que buscase uma forma de transformar os pontos negativos em positivos, propõe-se uma configuração alternativa de coletores solares poliméricos. Nesta configuração, substitui-se a camada superior (opaca) por um polímero semitransparente. Esta simples alteração tem duas implicações diretas: (i) a radiação solar é absorvida pela superfície interna da camada inferior de polímero, fazendo com que a baixa condutividade térmica dos polímeros seja uma vantagem, e não uma adversidade; e (ii) a própria água absorve radiação solar, potencializando a eficiência. Para diferenciar esta configuração das convencionais, utiliza-se neste texto o termo "coletor solar duopolimérico". Uma ilustração da comparação das duas configurações pode ser vista na figura 1.4.

Esta configuração, considerada como alternativa, não a é tanto assim, conforme será visto no capítulo 2. Esta configuração foi uma das precursoras do uso de energia solar para aquecimento de fluidos e já foi examinada por alguns autores, os quais exaltaram as suas

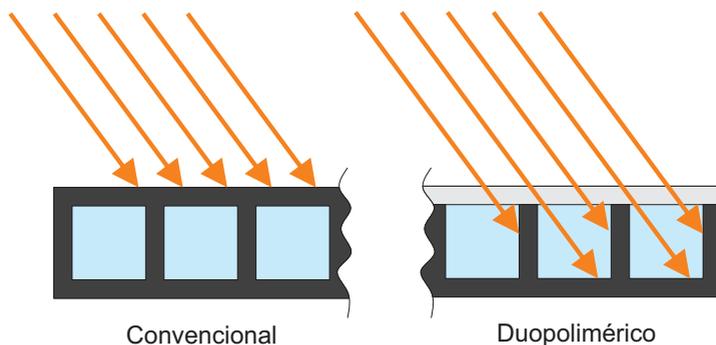


Figura 1.4: Comparação das configurações de coletores solares poliméricos convencional e duopolimérico.

potencialidades.

Enfim, os objetivos deste trabalho são: (i) construção de um modelo matemático para a representação dos fenômenos físicos e obtenção do perfil de temperaturas; (ii) obter computacionalmente a curva de desempenho; (iii) validação do modelo matemático comparando-o com resultados de ensaio experimental; e (iv) entender como os parâmetros construtivos afetam a curva de desempenho do coletor.

1.4 Organização do texto

O capítulo 2 examina as publicações científicas relacionadas a modelagem analítica e numérica, ensaios experimentais e análises de potencial de coletores solares de configuração semelhante aos duopoliméricos.

No capítulo 3 apresentam-se os modelos matemáticos a serem utilizados para a representação dos fenômenos físicos que ocorrem no coletor solar duopolimérico.

No capítulo 4, os modelos matemáticos são inseridos em um algoritmo computacional que faz a interface entre estes, possibilitando a obtenção do perfil térmico do coletor e, assim, sua eficiência. Também realiza-se uma avaliação dos erros de origem numérica advindos de parâmetros de discretização de malha e critério de convergência entre iterações.

O capítulo 5, primeiramente, detalha o protótipo fabricado para conduzir os ensaios experimentais. Em seguida, apresentam-se os

equipamentos utilizados para mensurar as grandezas de interesse, os procedimentos seguidos para uma correta caracterização do desempenho coletor solar e o tratamento dos dados para garantir a sua consistência e conformidade com a norma específica. Posteriormente, expõe-se as técnicas de regressão aplicadas para a obtenção dos parâmetros de desempenho térmico do coletor solar e, com estes, a construção da curva de desempenho térmico do mesmo. Por fim, os resultados experimentais são comparados com os resultados numéricos, a fim de validar o algoritmo computacional desenvolvido.

No capítulo 6, realiza-se uma série de simulações numéricas variando-se, isoladamente, alguns parâmetros construtivos. Analisam-se os efeitos de cada parâmetro na curva de desempenho do coletor e examinam-se as potencialidades proporcionadas por cada um destes. Com a sensibilidade adquirida destas análises, propõe-se uma configuração pré-otimizada do coletor solar duopolimérico.

Finalizando o trabalho, o capítulo 7 sintetiza as contribuições e resultados alcançados, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Harris *et al.* (1965) construíram um coletor solar para suprir as necessidades energéticas de uma planta de dessalinização. Neste processo, várias configurações de coletor solar foram testadas. As primeiras propostas de coletor solar eram do tipo bolsa d'água¹ - em que a camada superior era de polietileno transparente e a camada inferior de polietileno preto - coberto por dois filmes de material polimérico, sendo o superior (de polietileno ou polivinil) sustentado por um soprador de ar e o intermediário (de polivinil) somente fixado em suas bordas, e situado sobre uma camada de perlite granular, que funcionava como isolante térmico frente ao solo; todos os componentes eram abrigados em uma estrutura de madeira, conforme a figura 2.1. Estas propostas apresentaram alguns problemas: (i) formavam-se orifícios nas camadas de polietileno e que evoluíam para vazamentos, (ii) surgiu problemas estruturais na cobertura de filme polimérico superior, em razão da precipitação de chuva, e fizeram com que esta fosse substituída por vidro, (iii) a cobertura de filme polimérico intermediária degradava-se rapidamente devido às intempéries, e (iv) a camada de perlite granular acabava por absorver água e perder a sua funcionalidade. Em razão dos problemas, substituíram-se as camadas de polietileno por borracha butílica, a cobertura superior foi trocada por vidro (agora, sustentada por uma estrutura de alumínio), optou-se pelo Tedlar² para a cobertura intermediária e utilizou-se fibra de vidro como isolante térmico; esta configuração pode ser vista na figura 2.2. Destaca-se que os autores notam que a substituição da camada superior transparente do coletor solar por uma opaca adiciona uma resistência térmica ao sistema. Com a configuração final definida, alguns testes de desempenho foram realizados medindo o perfil de temperaturas do coletor e a radiação solar incidente no mesmo. Para ilustrar

¹Tradução livre para *water bag*.

²Tedlar é uma marca registrada para filmes de fluoreto de polivinil fabricados pela DuPont.

os gráficos apresentados, num dia em que a temperatura de entrada da água variou entre 44 °C e 60 °C, a eficiência do sistema variou entre 25 % e 52 % e a temperatura máxima de saída da água foi de 64 °C; já noutro em que a temperatura de entrada foi fixada em cerca 50 °C, a eficiência esteve entre 22 % e 37 % e a temperatura máxima de saída da água foi de 53,5 °C.

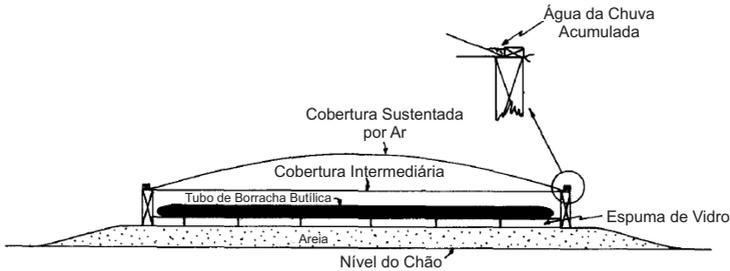


Figura 2.1: Ilustração da primeira proposta de Harris e colaboradores. Adaptado de Harris *et al.* (1965).

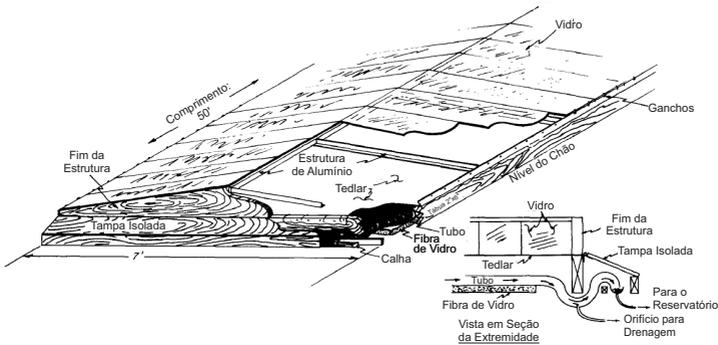


Figura 2.2: Ilustração da proposta final de Harris e colaboradores. Adaptado de Harris *et al.* (1965).

Gopffarth *et al.* (1968) realizaram experimentos e utilizaram-se de métodos estatísticos para determinar a eficiência ótica e a perda de calor de um coletor polimérico. O coletor solar era formado por uma camada superior semitransparente de polietileno e uma camada inferior de polietileno preto; este repousava em um caixa de espuma de

poliestireno fechada por uma a três coberturas de Tedlar. Utilizando-se das hipóteses e da estrutura da formulação propostas por Hottel e Woertz, conduziu-se uma bateria de experimentos a fim de obter correlações semi-empíricas para o cálculo da eficiência ótica e da perda de calor para o coletor polimérico proposto em função do número de coberturas, posição e irradiância solar, temperatura e umidade do ambiente e temperatura do coletor.

Khanna (1973) testou, no clima da Índia, um coletor solar disponível comercialmente no Japão para medir o seu desempenho – figura 2.3. O coletor solar era composto por uma camada superior semitransparente de vinil e uma camada inferior de vinil preto; este era posto em cima de uma tábua de madeira e coberto por uma camada de vinil semitransparente sustentando por hastes metálicas. O coletor foi experimentado por quase um ano e a sua eficiência diária variou entre 38 % e 50 %.

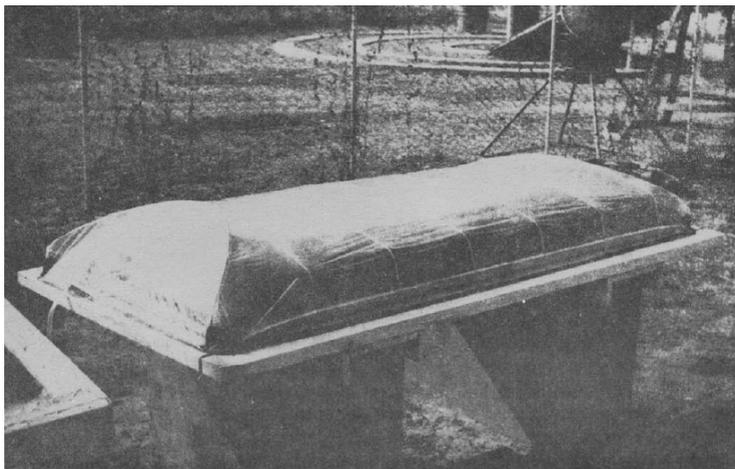


Figura 2.3: Foto do coletor solar testado por Khanna (1973). Retirado de Khanna (1973).

Kudish e Wolf (1978) testaram um coletor solar polimérico em Israel. O coletor solar compunha-se de uma bolsa semitransparente de cloreto de polivinila que era colocado dentro de uma caixa de madeira cujo espaço vazio (entre o coletor e a caixa) eram preenchidos com lã de rocha pintada de preto; acima da bolsa ainda havia uma cobertura de Tedlar que apoiava-se nas laterais do topo da caixa. A grande diferença deste coletor era a presença de uma tampa na caixa de madeira

para que esta fosse fechada no período da noite, mantendo a água aquecida durante este período, além de possuir um filme aluminizado de Mylar³ que aumentava a irradiância incidente na bolsa polimérica através da reflexão dos raios solares. Este coletor foi testado durante quatro meses, onde foi medido o desempenho do coletor solar e a influência da tampa refletora sobre este parâmetro. Para o coletor solar sem o auxílio da tampa refletora, chegou-se a um desempenho diário média de 38 %; quando a tampa refletora era utilizada, este rendimento alcançou 47 %. Os autores acharam o desempenho do coletor atrativo e recomendaram que este fosse produzido como uma peça única de espuma de poliuretano.

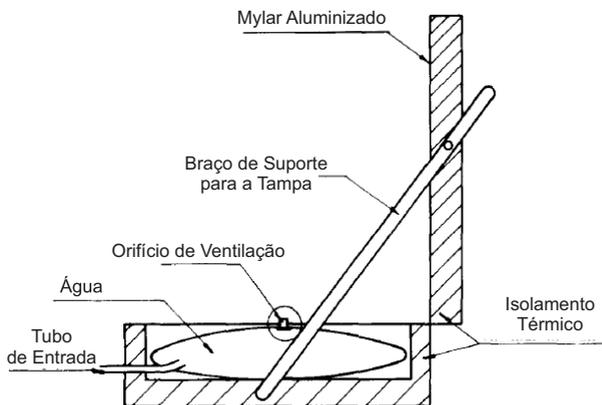


Figura 2.4: Ilustração do coletor solar testado por Kudish e Wolf (1978). Adaptado de Kudish e Wolf (1978).

Sodha *et al.* (1981) desenvolveu um modelo analítico para a predição da eficiência de um coletor solar do tipo *shallow solar pond*. O coletor era composto por uma caixa de madeira com as superfícies interiores enegrecidas e uma cobertura de vidro, como pode ser visto na figura 2.5. O modelo consiste basicamente em dois balanços de energia transientes, um para a superfície absorvedora (madeira enegrecida) e outro para a água (que absorve calor tanto por absorção direta da radiação solar como por convecção com a superfície do absorvedor). Para modelar a absorção de radiação solar pela água, utilizou-se a correlação sugerida por Kaushik *et al.* (1980), e os outros parâmetros de entrada - tais como absortância do absorvedor, a transmitância da

³Mylar é uma marca registrada para uma película de poliéster fabricada pela DuPont.

cobertura, os coeficientes de convecção d'água e com o ar, a condutância térmica do isolamento - foram arbitrados. As equações foram resolvidas pela técnica de transformada de Laplace e comparadas com resultados experimentais, obtendo resultados satisfatórios.

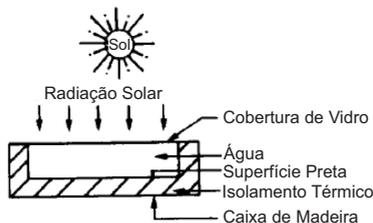


Figura 2.5: Ilustração do coletor solar analisado por Sodha *et al.* (1981). Adaptado de Sodha *et al.* (1981).

O'Brien-Bernini e McGowan (1984) propuseram várias configurações de coletores não metálicos a serem analisadas, quais sejam: placa absorvedora superior, placa absorvedora inferior, líquido negro absorvedor e esteira absorvedora. A análise baseia-se no modelo de Hottel e Whillier agregando os fatores de eficiência do coletor, desenvolvidos por Bliss, que foram reformulados visto que todas as hipóteses do modelo inicial de Bliss não se aplicavam à coletores não-metálicos. Dentre estas, as propostas de placa absorvedora inferior e líquido negro absorvedor foram as que apresentaram as melhores eficiências, as quais com valores semelhantes entre si. A vantagem da proposta de placa absorvedora inferior é trabalhar diretamente com o fluido de uso (água para fins domésticos) e não necessitar de um sistema de trocador de calor adicional, o que não só acarreta um maior custo inicial para o sistema, mas também pode degradar a eficiência global deste.

Abdelsalam (1984) analisou um coletor solar do tipo *shallow solar pond* durante um ano nas condições climáticas do Cairo, sendo a camada superior PVC semitransparente e a inferior PVC preto. Este coletor situava-se dentro de uma caixa de alumínio com uma cobertura de vidro. Entre a parte posterior do coletor e a caixa havia um isolamento formado por uma camada de polietileno e outra de lã de vidro, além disto, o sistema ainda contava com um vidro refletor para ampliar a radiação solar incidente no coletor, fixado em um ângulo de 10° com relação à vertical e em sentido ao exterior do coletor. Uma ilustração deste coletor pode ser vista na figura 2.6. O modelo matemático desenvolvido é um balanço de energia transiente na massa de água, onde arbitrou-se como fixo os valores de transmitância para o

PVC e o vidro, assim como a absorptância e a emitância do PVC preto e a emitância da cobertura de vidro. Para o cálculo da perda de calor pela parte superior, utilizou-se correlações empíricas, e pela parte inferior, modelou-se como condução para o solo, sendo a temperatura deste o valor da média mensal aferida entre os anos de 1957 e 1968. Outras hipóteses são a consideração da massa de água como isotérmica e a igualdade de temperatura entre a massa de água e a superfície absorvedora (PVC preto). Nos testes experimentais, este coletor, com uma profundidade de 10 cm, teve como parâmetros de absorção de calor, 0,792, e de perda de calor, $9,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$; retirando-se a cobertura de vidro, estes valores são, respectivamente, 0,842 e $12,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. Comparando-se o modelo numérico com os dados experimentais, observa-se uma temperatura da água entre 2°C e 4°C superior, ou seja, o modelo superestima o ganho de calor ou subestima a perda. Também é feita uma análise de sensibilidade da profundidade do absorvedor, onde se quantifica o que era esperado: quanto maior a profundidade, menor a temperatura máxima da água e maior a eficiência, e quanto menor a profundidade, o inverso é verdadeiro. Por fim, uma breve análise econômica, assumindo uma vida útil de dois anos para o coletor, mostra que o coletor solar polimérico é mais vantajoso frente aos coletores convencionais.

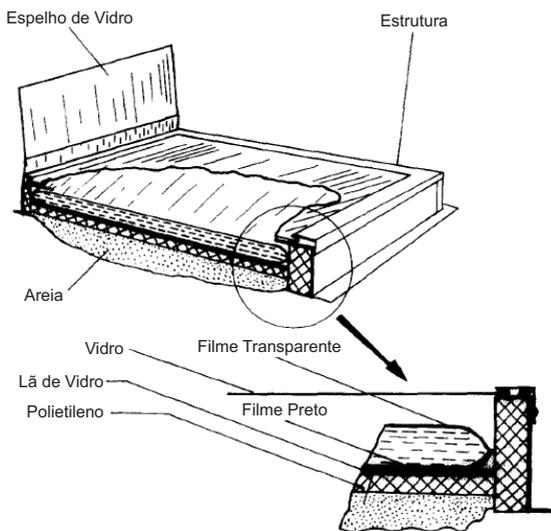


Figura 2.6: Ilustração do coletor solar testado por Abdelsalam (1984). Adaptado de Abdelsalam (1984).

Sodha *et al.* (1985) analisaram um coletor solar do tipo *shallow solar pond* compreendendo uma camada inferior de cloreto de polivinila (PVC) preto e uma camada superior que, na realidade, eram duas camadas de PVC semitransparente separadas por uma estrutura alveolar⁴ – vide figura 2.7. Primeiramente foi desenvolvido um modelo matemático para representar o coletor solar, que se tratou, basicamente, num balanço de energia transiente na massa de água. Considerou-se como hipóteses que a massa de água tinha temperatura uniforme em todos os instantes de tempo e que as camadas poliméricas não armazenavam calor. Ademais, arbitrou-se os valores de absorptância-transmitância efetiva e os coeficientes equivalentes de troca de calor por convecção mais condução. Comparou-se os resultados do modelo numérico com testes experimentais e encontrou-se uma boa concordância nas temperaturas da água, sendo que a diferença não excedeu os 2 °C. Adicionalmente, a eficiência diária média do sistema teve o valor de 38 %, comentando-se que o mesmo equipamento tinha alcançado uma eficiência de 44 % dois anos antes, assim sugerindo que a degradação da eficiência do sistema possa ser algo em torno de 3 % ao ano. Uma análise econômica também foi conduzida, explicitando que, apesar da eficiência menor e a degradação acelerada desta, o coletor solar polimérico com uma vida útil de quatro anos tem vantagem financeira quando comparada aos sistemas convencionais, em se tratando do custo da energia gerada por este.

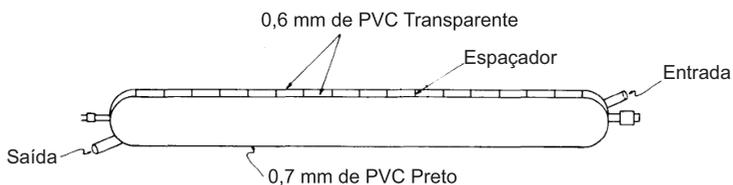


Figura 2.7: Ilustração do coletor solar testado por Sodha *et al.* (1985). Adaptado de Sodha *et al.* (1985).

Kishore *et al.* (1986) modelou matematicamente e testou experimentalmente duas configurações de coletores solares do tipo *shallow solar pond*, ambos com um trocador de calor interno ao coletor, ou seja, o fluido que é aquecido pela radiação solar não é o fluido de interesse. Duas configurações foram avaliadas: a primeira consistia em uma mistura de carvão e água em que tubos de aço galvanizado (onde a água

⁴Em inglês, denomina-se esta estrutura de *honeycomb*.

de interesse escoava) eram imersos, já a segunda uma camada de polietileno preto era totalmente coberta por água e abaixo do polietileno haviam tubos de aço galvanizado; esta configuração pode ser vista na figura 2.8. Ambas as configurações continham uma dupla camada de cobertura, sendo o material PVC para a primeira configuração e poliéster para a segunda, além de ambas terem isolamento de poliestireno na parte posterior e serem acomodados em caixas de madeira. O modelo baseou-se num balanço de energia transiente na massa de água e algumas hipóteses simplificativas: (i) o único meio de transferência de calor para o trocador de calor (tubos de aço galvanizado) era através de convecção com a camada de água ou mistura de água com carvão, (ii) o trocador de calor foi avaliado com um coeficiente global de transferência de calor desconsiderando resistência térmica do tubo de aço galvanizado e usando diferença de temperatura média logarítmica, (iii) a camada de água ou mistura de água com carvão é isotérmica, (iv) a cobertura intermediária, que está em contato com a camada de água, tem a mesma temperatura que esta, (v) a cobertura superior tem uma temperatura 5°C maior que a temperatura ambiente, (vi) as coberturas tem capacidade térmica desprezível. Para os coeficientes de transferência de calor foram utilizadas correlações empíricas e semi-empíricas e os dados de transmitância, absorptância e emitância das coberturas foram baseados na literatura. Algumas análises de sensibilidade do modelo foram realizadas com relação a velocidade do vento e fluxo de massa do trocador de calor. Adicionalmente, após a realização dos testes experimentais, verificou-se a validade de algumas hipóteses, tais como as do trocador de calor e o coeficiente de transferência de calor com o vento. A primeira hipótese é válida para as duas configurações, ao passo que a segunda não tem validade para a configuração que utiliza o polietileno; fato atribuído à má vedação das coberturas e que poderia provocar infiltração de ar e/ou induzir vibração na camada de água. Ainda, para a segunda configuração chegou-se aos valores de 0,792 para o coeficiente de absorção de calor e $9,0\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$ para o de perda. Por fim, um rápido comentário que este tipo de sistema é entre 5 e 7 vezes mais barato que os sistemas convencionais de coletores vidro-metálicos, mostrando, portanto, o potencial de aplicação.

Kishore *et al.* (1987) realizaram testes experimentais com três configurações de coletores solares do tipo *shallow solar pond*. Todos os coletores eram situados dentro de uma caixa de madeira sem fundo e utilizavam Rexine⁵ como a camada inferior (absorvedor) e PVC se-

⁵Rexine é a marca registrada de um tecido de couro sintético produzido no Reino Unido.

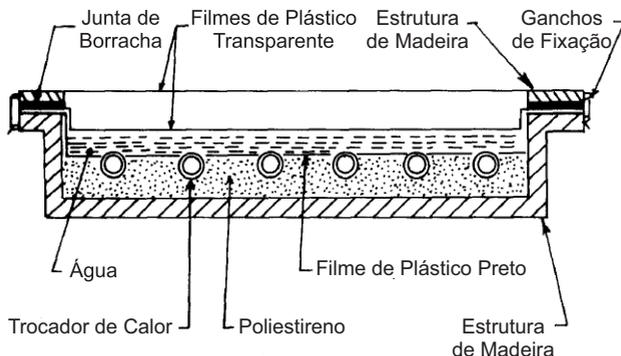


Figura 2.8: Ilustração de um dos coletores solares modelados por Kishore *et al.* (1986). Adaptado de Kishore *et al.* (1986).

mitransparente como a superior (cobertura). A primeira configuração utilizava a camada inferior em contato direto com o chão e a cobertura era composta por duas camadas de PVC que, infladas com ar, adquiriam a forma de um travesseiro; este travesseiro, então, era posto para flutuar na água retida pela camada inferior. Já a segunda configuração também continha duas camadas de PVC: uma ficava com toda a sua superfície em contato direto com a água e a outra, acima da primeira, era sustentada por hastes de alumínio. Por fim, a terceira configuração tinha duas camadas de PVC que haviam sido unidas longitudinalmente para formar uma estrutura alveolar; adicionalmente, esta configuração tinha um isolamento posterior de poliestireno rígido. Ao testar as configurações, percebeu-se que a primeira era inviável devido a vazamentos no travesseiro de PVC; não conseguindo-se testá-la adequadamente, portanto foi descontinuada. A segunda proposta não apresentou problemas e foi capaz de elevar a temperatura da água entre 20 °C e 25 °C acima da temperatura ambiente. Semelhantemente, a terceira configuração foi bem sucedida apresentando resultados superiores aos da segunda. Finalmente, uma sucinta análise dos custos de fabricação destas configurações de coletor foram comparadas aos dos de coletores convencionais vidro-metálicos e concluiu-se que os poliméricos custam a quinta parte, podendo este fator tornar atrativo os coletores poliméricos, mesmo com a rápida deterioração do PVC.

González *et al.* (1992) realizaram uma investigação de um coletor solar do tipo *shallow solar pond* nas condições de Porto Rico e extrapolaram as suas conclusões para as outras ilhas caribenhas. Primeiramente os autores desenvolveram dois modelos matemáticos: um para representar um coletor polimérico com a camada superior semitransparente

e com a inferior opaca, e outro para representar um com ambas as camadas opacas. O primeiro modelo consiste em um balanço de energia transiente na massa de água, resolvido facilmente por integração, e o segundo modelo é composto por duas equações de balanço de energia transiente, um para a camada opaca superior e outro para a água. Em ambos os modelos desconsiderou-se a perda de calor pela parte posterior do coletor; para o segundo modelo, exclusivamente, considerou-se a condução como meio principal de transferência de calor entre a camada opaca e a água. Como o modelo de coletor todo opaco tornou-se mais complexo, resolveu-se este utilizando a técnica de transformada de Laplace e o método dos resíduos para encontrar a transformada inversa. Em seguida, testes experimentais foram conduzidos em um coletor do tipo todo opaco para que fosse medido o seu desempenho e este fornecesse o coeficiente de transferência de calor global para o modelo matemático. Outros dados de entrada, como a transmitância e absorvância dos materiais, foram obtidos da literatura. Com estes dados, observou-se o comportamento do coletor quando variada a sua profundidade e, por fim, compararam-se os resultados experimentais e numéricos, que apresentaram concordância satisfatória, com uma variação máxima de 5°C para a temperatura da água e de até 16,6% para a eficiência diária do coletor.

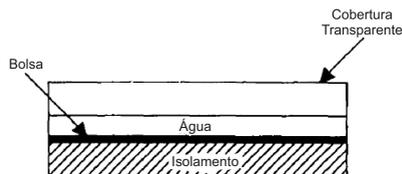


Figura 2.9: Ilustração do coletor solar modelado por González *et al.* (1992). Adaptado de González *et al.* (1992).

Tsilingiris (1997) realizou uma investigação numérica de um coletor solar do tipo *shallow solar pond* em modo de operação por lotes - isto é, não há fluxo de água através do coletor. Para a análise numérica, o pesquisador utilizou-se da equação diferencial ordinária de balanço térmico transiente de uma camada de água de espessura constante e de algumas hipóteses, quais sejam: (i) fator de remoção de calor, F_R , igual a um, (ii) produto transmitância-absorvância em incidência normal, $(\tau\alpha)_n$, igual a 0,85, (iii) uso de equação semi-empírica para a determinação do coeficiente de perda de calor pelo topo, U_t , (iv) fator geométrico R_B igual a um e (v) coeficiente de modificação do ângulo de

inciência, b_0 , igual a $-0,1$. Utilizando-se da base de dados meteorológicos de longo termo da cidade de Atenas, na Grécia, o autor realizou uma análise de sensibilidade da temperatura de saída da água frente a espessura da camada de água em dias típicos de inverno e de verão variando-a entre 5 cm e 20 cm. Para o dia de inverno, a temperatura da água variou entre $20\text{ }^\circ\text{C}$ e $40\text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que, para o dia de verão, os valores foram de $42\text{ }^\circ\text{C}$ e $77\text{ }^\circ\text{C}$. Nesse sentido, avaliaram-se a temperatura máxima média mensal - ou seja, uma média das temperaturas máximas diárias - e a energia coletada para o ano meteorológico típico da localidade; concluiu-se que demandas de água a uma temperatura de $45\text{ }^\circ\text{C}$ podem ser atendidas entre os meses de maio e setembro e que a energia coletada é função direta da espessura da camada de água. Devido a restrições sanitárias de qualidade da água, avaliou-se o impacto do uso de um trocador de calor na eficiência do coletor. Para isso, variou-se a efetividade do trocador de valor entre 50 % e 100 % e entendeu-se que a redução na eficiência do coletor devido ao uso de trocadores de calor situa-se em torno de 35 % e 40 %, sendo esta menor para uma espessura da camada da água menor. Com o intuito de avaliar o desempenho do coletor, construiu-se a curva de eficiência deste e esta foi comparada com a curva de eficiência de um coletor similar disponível na literatura. O coletor proposto apresentou 0,815 para o coeficiente de absorção de calor e $7,03\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$ para o de perda, ao passo que, respectivamente, os valores para o outro coletor foram de 0,742 e $6,80\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$, fato atribuído, principalmente, ao uso de cobertura de vidro de alta qualidade ótica no coletor proposto. Ainda, com os mesmos dados da análise anterior, curvas demonstrando a temperatura máxima diária e a eficiência diária do coletor com respeito a profundidade da camada da água foram confeccionadas, exibindo a queda da eficiência diária do coletor com a redução da profundidade da camada de água, ao mesmo tempo em que a temperatura máxima diária aumenta. Por fim, elaborou-se curvas relacionando a energia solar incidente com a energia coletada, ambas em base diária, para diferentes profundidade de camada da água; inferiu-se que a eficiência diária do sistema varia entre 45 % e 70 %, e que o aumento da eficiência diária exibe rápido crescimento até uma profundidade de camada da água de 10 cm, desacelerando após este patamar.

Janjai *et al.* (2000) realizaram uma investigação numérica e experimental de um coletor solar composto por materiais plásticos, utilizado para fornecer água quente à um hotel em Almería, na Espanha. O coletor solar consistia do que o autor denominou de *water bag*, similar, senão igual, à um *shallow solar pond*, com uma cobertura adicional de

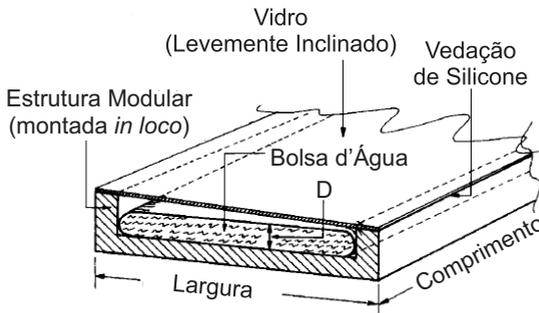


Figura 2.10: Ilustração do coletor solar analisado por Tsilingiris (1997). Adaptado de Tsilingiris (1997).

plástico e situado sobre uma camada isolante de espuma de plástico sanduichada entre duas folhas metálicas, cujas dimensões eram de 48,2 m de comprimento e 1,25 m de largura (demais dimensões não foram citadas); uma ilustração do coletor pode ser observada na figura 2.11. Definida a estrutura, contruíram-se balanços térmicos para cada componente do coletor solar, quais sejam: cobertura (adicional) de plástico, camada superior da *water bag*, camada de água e camada inferior da *water bag*; onde as múltiplas reflexões da radiação solar foram negligenciadas. Utilizou-se correlações da literatura para os coeficientes de convecção e para o cálculo da transmitância da água, ao passo que, para as propriedades ópticas das camadas de plástico, foram usados dados medidos experimentalmente. Através do modelo físico construído e do monitoramento das variáveis meteorológicas relevantes, calculou-se o desempenho do coletor solar em condições reais de operação e coletou-se os dados de entrada necessários para o modelo matemático desenvolvido. Para validar as subseqüentes simulações numéricas, os autores compararam as temperaturas de saída da água do coletor obtidas experimental e numericamente, obtendo uma boa concordância. Com o modelo numérico validado, conduziram-se análises de sensibilidade de quatro parâmetros sobre a temperatura de saída da água e o desempenho térmico do coletor solar: profundidade da camada da água, fluxo mássico de água, comprimento do coletor solar e velocidade do vento. As conclusões das análises foram, principalmente, a forte influência dos três primeiros parâmetros citados sobre a temperatura de saída da água e do desempenho do coletor e a pouco sensibilidade à velocidade do vento, fato atrelado à existência de uma cobertura adicional de plástico. Por fim, sugeriu-se a otimi-

zação da operação do modelo físico construído através do ajuste do fluxo mássico à profundidade da camada de água e do comprimento do coletor solar, obtendo um aumento no coeficiente de absorção de calor (cerca de 0,4 para aproximadamente 0,5), em detrimento de um leve aumento no coeficiente de perda de calor.

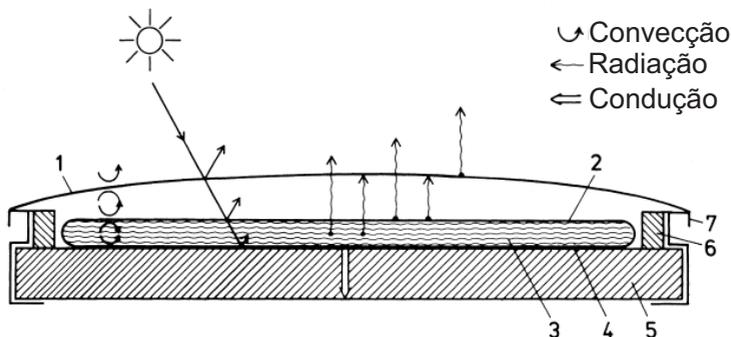


Figura 2.11: Ilustração do coletor solar estudado por Janjai *et al.* (2000), onde: (1) cobertura de plástico, (2) camada superior transparente da bolsa d'água, (3) água, (4) camada inferior opaca da bolsa d'água, (5) isolamento térmico de fundo, (6) isolamento térmico lateral, e (7) estrutura de metal. Adaptado de Janjai *et al.* (2000).

Tsilingiris (2002) defende a adoção de coletores solares poliméricos para o barateamento da energia solar térmica. Nesse sentido, o autor sugere o reprojeto dos coletores solares poliméricos tradicionais - em suas palavras, *top absorbing plate design* - para coletores solares poliméricos do tipo *shallow solar pond* com uma cobertura adicional de vidro - em suas palavras, *back absorbing plate design* - em virtude das dificuldades encontradas naqueles. Com o intuito de avaliar o potencial de sua proposta, que pode ser vista na figura 2.12, o pesquisador elabora um modelo numérico de rede de resistências térmicas para a sua simulação, fazendo os devidos balanços térmicos em cada nó. Para isso, desconsiderou-se a absorção de radiação solar tanto pela cobertura de vidro como pela camada polimérica superior do coletor solar, tratou-se o fluido de transferência de calor, tradicionalmente água, como opaco à radiação infravermelha, e aplicou-se o método de radiação líquida para o cálculo das interações da água e da camada inferior polimérica com a radiação solar. Após a inserção sucessiva de uma equação noutra, obtém-se uma equação única, que nos molde da equação de Hottel-Whillier-Bliss. Obtida essa equação, o autor

realiza variadas análises de sensibilidade de variáveis como o coeficiente de convecção da água, espessura e condutividade térmica das camadas poliméricas e coeficientes de perda de fundo e de topo sobre o parâmetro de ganho e de perda de calor do coletor solar, e também compara a proposta de *top absorbing plate design* com a de *back absorbing plate design*. Uma das conclusões é que, indefinidamente, o decréscimo da condutância das camadas poliméricas - seja pelo aumento de sua espessura ou pela redução da condutividade térmica do material - aumenta o parâmetro de ganho solar e reduz o de perda; entretanto, o autor comenta que esse efeito deve-se a simplificação de desconsiderar a absorção de radiação solar pela cobertura de vidro e pela camada polimérica superior. A outra conclusão é que, em condições similares, a configuração de *back absorbing plate design* contempla, em média, um parâmetro de ganho de calor 20 % maior e um parâmetro de perda de calor 15 % menor que a de *top absorbing plate design*, além de apresentarem comportamentos opostos para essas variáveis quando varia-se a condutância das camadas poliméricas. Ainda, assumindo um produto transmitância-absortância e um parâmetro de ganho de calor similares, mostra-se que o coletor de *back absorbing plate design* alcança um acréscimo de quase 14 % na curva de desempenho do coletor solar, se comparado ao *top absorbing plate design*, que, dadas as considerações do autor, tem desempenho quase idêntico a de um coletor vidro-metálico tradicional.

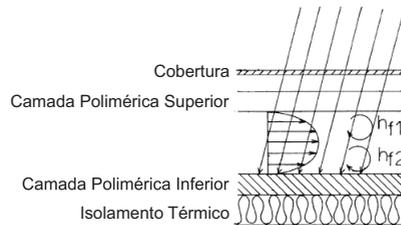


Figura 2.12: Ilustração do coletor solar modelado por Tsilingiris (2002). Adaptado de Tsilingiris (2002).

3 Modelos Matemáticos para Simulação Numérica

O capítulo em questão discorre sobre os diferentes modelos matemáticos utilizados para a representação dos fenômenos físicos que ocorrem em um coletor solar duopolimérico, além da região de aplicação dos diferentes modelos, que nada mais são que as condições de contorno.

É digno de nota que optou-se por descrições elementares para os fenômenos físicos, evitando a necessidade de quaisquer parâmetros advindos de ensaios experimentais e similares.

3.1 Visão geral

Com o intuito de avaliar a eficiência do coletor solar duopolimérico, faz-se necessário a determinação de quanto calor o mesmo consegue absorver da radiação solar e quanto calor é perdido para o ambiente. Para que isto seja realizado, vários fenômenos tem de ser equacionados, tornando possível o cálculo de quanto calor chega até as superfícies do coletor solar duopolimérico e, avaliando o perfil térmico resultante, quais são as perdas de calor para o ambiente. A base do modelo matemático é a primeira lei da termodinâmica – ou a equação (da conservação) da energia – que nos serve para calcular as trocas de energia de uma região com o seu entorno (vizinhança) e, ainda, o ambiente. A forma geral desta equação, em termos da temperatura, é (BEJAN, 2004)

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (-\mathbf{q}'') + q''' + \beta T \frac{DP}{Dt} + \mu \Phi \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade do material (sólido, líquido ou gás), c_p é o calor específico do material, T é a temperatura do material, t é o tempo, \mathbf{q}'' é o vetor fluxo de calor devido a gradientes de temperatura, q''' é o termo de geração interna de energia, β é o coeficiente de expansão térmica do material, P é a pressão do material, μ é a viscosidade absoluta

(ou dinâmica) do material e Φ é o termo de dissipação viscosa. O vetor fluxo de calor, \mathbf{q}'' , pode ser decomposto em dois modos de transferência de calor distintos: condução e radiação. Neste sentido, temos que

$$\mathbf{q}'' = \mathbf{q}_c'' + \mathbf{q}_r'' \quad (3.2)$$

onde \mathbf{q}_c'' é o vetor fluxo de calor por condução e \mathbf{q}_r'' é o vetor fluxo de calor por radiação.

Considerando o sistema em regime permanente e que o material é um sólido, como é o caso de polímeros, a equação é simplificada na forma

$$0 = \nabla \cdot (-\mathbf{q}_c'' - \mathbf{q}_r'') + q''' \quad (3.3)$$

Do mesmo modo, em um sistema em regime permanente, no entanto, considerando que o material é um líquido incompressível e cuja dissipação viscosa é desprezível – neste caso, o líquido é a água, tem-se

$$v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (-\mathbf{q}_c'' - \mathbf{q}_r'') + q''' \quad (3.4)$$

As equações 3.3 e 3.4 são as utilizadas para a modelagem matemática dos polímeros (opaco e semitransparente) e da água, respectivamente.

Para a resolução destas equações, decidiu-se pelo uso do método dos volumes finitos, tendo em vista a sua simplicidade, adaptabilidade e adequabilidade ao problema proposto – além de familiaridade por parte do autor.

Sendo o coletor solar proposto nada mais que vários canais adjacentes idênticos, decidiu-se pela simulação de somente um destes canais e extrapolação do resultado para os demais, a fim de obter o desempenho do coletor solar como um todo. Esta ideia é representada pela figura 3.1 e detalha-se o canal objeto de estudo na figura 3.2.

Definido o domínio de resolução das equações – isto é, um canal do coletor solar – a figura 3.3 exemplifica a discretização deste em volumes finitos, os quais terão aplicados as equações correspondentes, a depender do material.

A discretização das equações 3.3 e 3.4 não é o objeto principal deste trabalho. Este desdobramento é apresentado no Apêndice A.

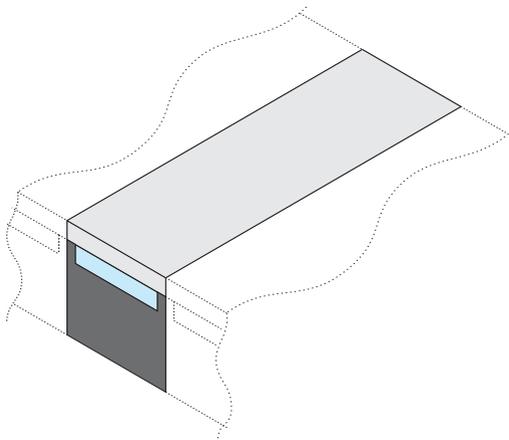


Figura 3.1: Domínio de resolução proposto, juntamente com seus canais adjacentes.

Conforme foi dito, o modelo matemático é fundamentado na primeira lei da termodinâmica. No entanto, as informações necessárias para esta equação são advindas de modelos matemáticos para outros fenômenos; estes modelos serão abordados nas seções que seguem.

3.2 Radiação solar

A radiação solar, como o próprio nome diz, é aquela que vem do Sol, a estrela principal do sistema planetário que leva o seu nome. Apesar de, a rigor, a radiação solar estender-se por todo o espectro eletromagnético, a grande maioria da energia (mais de 99%) que alcança a superfície terrestre situa-se na faixa de comprimento de onda entre $0,25 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$ (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Isto significa que, para cálculos de engenharia, considera-se somente a faixa citada.

3.2.1 As componentes da radiação

Desde o momento em que a radiação solar chega ao topo da atmosfera – deixando, então, o vácuo – até esta atingir a superfície terrestre, uma sucessão de fenômenos de absorção e dispersão ocorrem com a mesma. Dado estes fenômenos, são dois os efeitos principais na radiação solar que atinge a superfície terrestre: (i) diminuição de sua intensidade, ou seja, uma redução do seu conteúdo energético e (ii) indefinição da direção de parte desta, que, até atingir a atmosfera, era

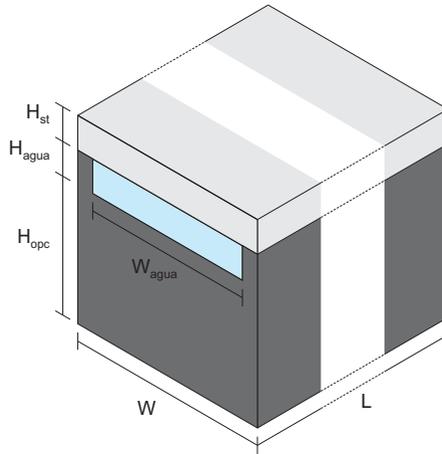


Figura 3.2: Dimensões do coletor.

bem definida – vinda do Sol. Devido ao segundo efeito citado, para efeitos práticos, a radiação solar é separada em duas componentes: direta e difusa, cuja soma resulta na chamada radiação global, que é a quantidade total de radiação solar que atinge uma superfície. A radiação direta é aquela que não sofreu efeitos de dispersão até atingir a superfície terrestre, diferentemente da radiação difusa, que é, justamente, a que sofreu os efeitos de dispersão. Esta divisão se faz necessária para que as interações entre a radiação solar e as superfícies que serão atingidas por esta sejam corretamente avaliadas; este entendimento ficará explícito mais adiante.

3.2.2 Geometria solar

Em consequência dos movimentos da Terra – rotação em seu próprio eixo e translação ao redor do Sol – além da inclinação de seu eixo de rotação frente a órbita de seu movimento de translação, a trajetória do Sol no céu varia de acordo com a hora do dia, do dia e da localidade em que esta é observada. Estes fatores devem ser levados em consideração para a correta caracterização da radiação direta, isto é, o ângulo de incidência desta em uma superfície.

Segundo Duffie e Beckman (2013), o ângulo de incidência da ra-

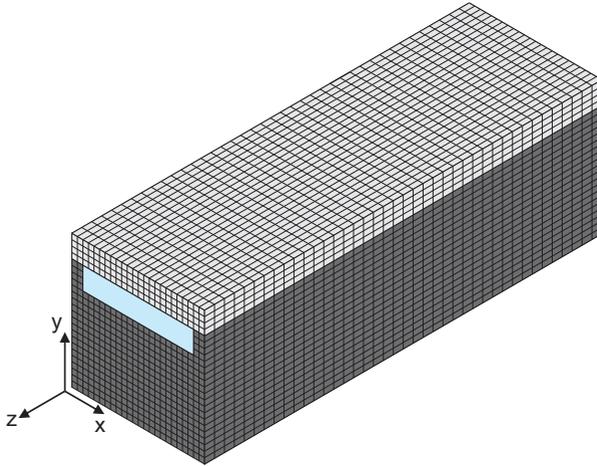


Figura 3.3: Seção do coletor solar e uma ilustração de sua malha.

dição direta em uma superfície, θ , é dado pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde δ é a declinação da trajetória solar, ϕ é a latitude do local onde a superfície se encontra, β é o ângulo de inclinação da superfície, isto é, o ângulo entre o plano da superfície e a horizontal, γ é o ângulo de azimute da superfície e ω é o ângulo horário. A figura 3.4 indica estes ângulos para uma situação hipotética.

A declinação, em radianos, pode ser calculada, segundo Spencer (1971) *apud* Duffie e Beckman (2013), através da equação:

$$\begin{aligned} \delta = & (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B \\ & - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B \\ & - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \end{aligned} \quad (3.6)$$

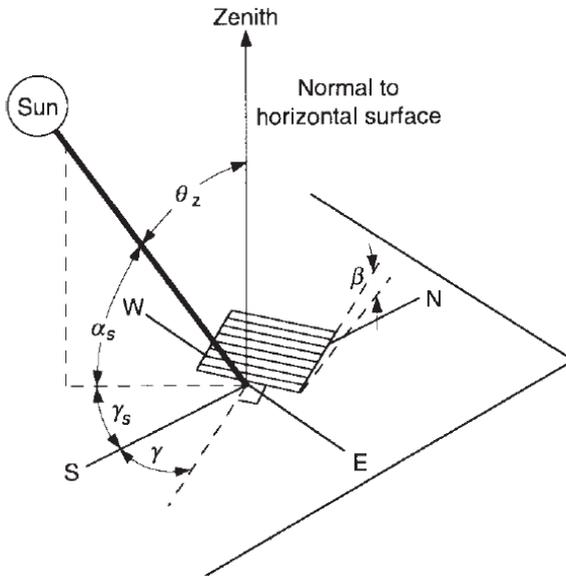


Figura 3.4: Ilustração dos ângulos entre um raio solar (radiação direta) e uma superfície inclinada. Retirado de Duffie e Beckman (2013).

sendo que a variável auxiliar, B , é dada por:

$$B = (N - 1) \frac{360}{365} \quad (3.7)$$

onde N é o dia do ano (começando com 1 para o dia 1 de janeiro). E, o ângulo horário, em radianos, é calculado por:

$$\omega = \frac{\pi}{12} (H - 12) \quad (3.8)$$

onde H é a hora solar do dia, sendo o meio dia solar a hora solar zero ($H = 0$), as horas matutinas negativas e as horas vespertinas positivas.

O ângulo de incidência da radiação direta, θ , é suficiente para determinar o comportamento óptico desta. Contudo, para que seja avaliado o sombreamento de certas partes do coletor, faz-se necessário a determinação do ângulo de azimute solar, γ_s . Este ângulo é

determinado por (DUFFIE; BECKMAN, 2013)

$$\gamma_s = \frac{\omega}{|\omega|} \left| \arccos \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (3.9)$$

onde o ângulo θ_z é o ângulo de zênite, que nada mais é que o ângulo de incidência, θ , para uma superfície horizontal ($\beta = 0$). Substituindo esta constatação na equação 3.5, obtém-se

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.10)$$

A radiação difusa passa pelas mesmas interações que a radiação direta, mas, como não possui uma direção bem definida, terá um tratamento diferente, como será visto adiante. Também por este motivo, não considera-se um eventual sombreamento de qualquer uma das superfícies frente à radiação difusa, assumindo que todas estas recebem o mesmo fluxo de calor.

3.2.3 Polímero semitransparente

A primeira interação da radiação solar com o polímero semitransparente ocorre na interface deste. Esta radiação, que até então propagava-se no ar, depara-se com o polímero semitransparente, o que significa uma mudança de índice de refração. Esta variação provoca uma alteração na velocidade de propagação da radiação que adentra o polímero - o fenômeno da refração, ao mesmo tempo que parte desta acaba sendo rejeitada na própria interface - o fenômeno da reflexão. Para avaliar estes fenômenos, utiliza-se das equações de Maxwell juntamente com as propriedades dos meios e a hipótese de que a superfície é ópticamente lisa, ou seja, a rugosidade desta é muito menor que o comprimento de onda da radiação que a irradia.

A rigor, os índices de refração dos meios são definidos por

$$\bar{n}_\lambda = n_\lambda - \hat{j}k_\lambda \quad (3.11)$$

onde \bar{n} é o índice de refração complexo, n é o índice de refração real e k é o coeficiente de extinção, calculado pela expressão (HOWELL *et al.*,

2011)

$$k_\lambda = \frac{\kappa_\lambda \lambda}{4\pi} \quad (3.12)$$

onde κ é o coeficiente de absorção. Os subscritos λ nas variáveis denotam dependência espectral nestas.

Para cálculos de engenharia, duas hipóteses podem ser adotadas: (i) propriedades espectralmente constantes e (ii) meios dielétricos, isto é, $k \rightarrow 0$. A primeira é justificada pela delimitação do espectro eletromagnético a uma banda (por exemplo, radiação solar ou térmica) em que as propriedades são praticamente constantes, e a segunda pode ser confirmada através da equação 3.12 e as propriedades ópticas encontradas em polímeros. Para a radiação solar¹, valores de coeficiente de absorção para polímeros semitransparentes variam entre 5 m^{-1} e 100 m^{-1} , o que resulta em um coeficiente de extinção na faixa de $1,2 \times 10^{-7}$ até 2×10^{-5} . Já para a radiação térmica², os valores de coeficientes de absorção situam-se na faixa de 500 m^{-1} a 5000 m^{-1} , e, assim, o valor de coeficiente de extinção tem valor entre $1,2 \times 10^{-4}$ e $1,6 \times 10^{-2}$. Enfim, efetivamente, os valores de coeficiente de extinção são suficientemente pequenos para que sejam considerados como nulos.

Com as hipóteses adotadas, o ângulo de refração é dado pela *Lei de Snell* (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\frac{\sin \chi}{\sin \theta} = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.13)$$

onde χ é o ângulo de refração, n_1 é o índice de refração real do meio a montante e n_2 é o índice de refração a jusante. Uma ilustração destes ângulos pode ser vista na figura 3.5.

Dependendo da polarização da radiação em relação ao plano de incidência sobre a superfície, a refletividade da interface é calculada por uma das duas expressões que seguem (HOWELL *et al.*, 2011):

$$\rho_\perp = \frac{\sin^2(\theta - \chi)}{\sin^2(\theta + \chi)} \quad (3.14)$$

¹Comprimento de onda entre $0,25 \mu\text{m}$ e $2,5 \mu\text{m}$.

²Comprimento de onda entre $3,0 \mu\text{m}$ e $40,0 \mu\text{m}$.

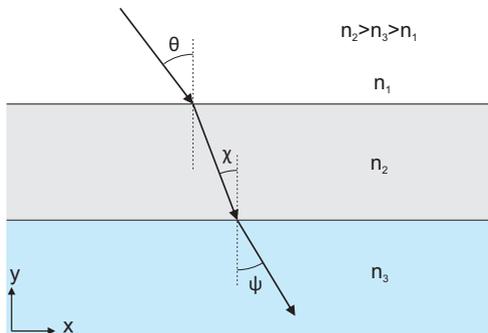


Figura 3.5: Ilustração do fenômeno da refração.

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta - \chi)}{\tan^2(\theta + \chi)} \quad (3.15)$$

sendo a equação 3.14 para polarização perpendicular e a equação 3.15 para polarização paralela ao plano de incidência.

Para o caso de radiação não polarizada – em que esta não possui uma orientação de plano de propagação prioritária – considera-se que as orientações possuem contribuição igual. Deste modo, a refletividade da interface é dada pela expressão (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta - \chi)}{\sin^2(\theta + \chi)} + \frac{\tan^2(\theta - \chi)}{\tan^2(\theta + \chi)} \right] \quad (3.16)$$

conhecida como *equação de Fresnel*.

Percebe-se que todas as relações acima exigem um ângulo de incidência bem definido, privilégio somente da radiação direta. Sendo assim, para que as equações possam ser aplicadas para a radiação difusa, deve-se avaliar as relações para todos os ângulos de incidência possíveis – entre 0° e 90° – e integrá-los conforme a seguinte ponderação (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\rho_{dif} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \rho(\theta) \sin \theta \cos \theta \, d\theta \quad (3.17)$$

A segunda interação da radiação solar com o polímero semitrans-

parente restringe-se à que adentrou o mesmo. Após ter sido refratada, a radiação solar sofre uma redução de sua intensidade durante a sua propagação intrasólido. Este fenômeno leva o nome de atenuação e, dada uma certa direção, pode ser estimado através da *Lei de Beer*³ (HOWELL *et al.*, 2011)

$$I(S) = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{\lambda}(0) \exp \left[- \int_0^S \beta_{\lambda}(S^*) \, dS^* \right] d\lambda \quad (3.18)$$

onde I é a intensidade da radiação – sendo $I(0)$ a intensidade da radiação na origem, e $I(S)$, após percorrer uma distância S – e β é o coeficiente de atenuação, podendo ter dependência espectral e espacial, dado por (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\beta = \kappa + \sigma_d \quad (3.19)$$

sendo κ o coeficiente de absorção e σ_d o coeficiente de dispersão.

Percebe-se que as equações 3.18 e 3.19 expressam a atenuação exponencial da intensidade da radiação ao percorrer um determinado trajeto devido a dois diferentes fenômenos: absorção e dispersão. A absorção trata da redução da intensidade devido ao aumento da energia do material em que a radiação se propaga e o da dispersão refere-se ao espalhamento da radiação. Neste trabalho, optou-se por desconsiderar os efeitos de dispersão no polímero semitransparente ($\sigma_d = 0$) haja vista que, comumente, estes termos são pequenos para polímeros semitransparentes e, também, porque a inclusão deste efeito depende da resolução de uma equação integro-diferencial que seria injustificavelmente complexa para o problema proposto. Além disto, conforme dito, as propriedades ópticas foram consideradas constantes para a faixa de comprimento de onda da radiação solar. Com estas considerações, a equação 3.18 simplifica-se para

$$I(S) = I(0) \exp(-\kappa_S S) \quad (3.20)$$

onde o subscrito S no coeficiente de absorção denota que este é válido somente na banda de comprimento de onda da radiação solar.

Ao contrário da reflexão na interface ar-polímero semitransparente, no caso da atenuação (por absorção) da radiação, a fração de

³Também chamada de *Lei de Lambert-Bouguer*.

intensidade de radiação que é afetada ainda faz parte do objeto da análise: o polímero semitransparente atenua a radiação e, com isto, aumenta a sua temperatura. Este efeito é contemplado no divergente do fluxo radiativo (vide equação 3.1).

O divergente do fluxo radiativo é dado pela seguinte equação (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\nabla \cdot \mathbf{q}_r'' = 4\pi \int_{\lambda=0}^{\infty} \kappa_{\lambda} [I_{\lambda b} - \bar{I}_{\lambda}] d\lambda \quad (3.21)$$

onde I_b é a intensidade de radiação de corpo negro, e \bar{I} é a intensidade média de radiação incidente. Em resumo, naturalmente concordando com o conceito físico do operador matemático, o divergente do fluxo radiativo nada mais é que um balanço energético numa região-limite. Neste caso, o termo com a intensidade de radiação de corpo negro, I_b , retrata as perdas energéticas deste ponto (emissão de energia), ao passo que o termo com a intensidade de radiação indidente média, \bar{I} , demonstra os ganhos energéticos (absorção de energia).

Proseguindo, a intensidade média de radiação incidente, \bar{I} é dada por⁴ (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\begin{aligned} \bar{I}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{4\pi} \int_A I(\mathbf{r}_0) \frac{[\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} \exp(-\beta |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) dA_0 \\ & + \frac{\beta}{4\pi} \int_V \hat{I}(\mathbf{r}^*) \frac{\exp(-\beta |\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|^2} dV^* \end{aligned} \quad (3.22)$$

onde \mathbf{r} é o vetor posição do ponto de interesse, \mathbf{r}_0 é o vetor posição de pontos localizados nas fronteiras (área) e \mathbf{r}^* é o vetor posição de pontos localizados no interior do meio (volume) e \hat{I} é a função fonte⁵, que representa a emissão e dispersão vindas da direção Ω_i através do caminho S e calculada como segue (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\hat{I} = (1 - \omega) I_b + \frac{\omega}{4\pi} \int_{\Omega_i=0}^{4\pi} I(\Omega_i) \Phi(\Omega, \Omega_i) d\Omega_i \quad (3.23)$$

⁴Por motivos de clareza, suprimiu-se o subscrito λ da equação.

⁵Em inglês, *source function*.

onde ω é o albedo de dispersão, dado por

$$\omega = \frac{\sigma_d}{\kappa + \sigma_d} \quad (3.24)$$

e $\Phi(\Omega, \Omega_i)$ é a função fase de dispersão⁶ – que representa como a radiação é dispersa para um ângulo sólido Ω , quando esta é vinda de um ângulo sólido Ω_i .

Como já mencionado, decidiu-se por desconsiderar o efeito de dispersão no polímero semitransparente ($\sigma_d = 0$ – consequentemente, $\omega = 0$), simplificando a equação 3.23 para

$$\hat{I} = I_b = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (3.25)$$

isto significa que a função fonte é igual a intensidade de radiação de corpo negro para um meio sem dispersão.

Por ser extenso, o desenvolvimento da equação 3.22 encontra-se no Apêndice B. A forma final da equação é a que segue

$$\begin{aligned} \bar{I}(\eta, \zeta) &= \frac{1}{4} \int_{\phi_1}^{\phi_2} I(\eta_0, -1) S_2 \left[\frac{(\zeta + 1)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \\ &+ \frac{1}{4} \int_{\phi_3}^{\phi_4} I(\eta_0, 1) S_2 \left[\frac{(\zeta - 1)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \\ &+ \frac{1}{4} \int_{\phi^*} \int_{r^*} I_b(r^*, \phi^*) S_1(r^*) dr^* d\phi^* ; \end{aligned} \quad (3.26)$$

onde η e ζ são parâmetros adimensionais relacionados, respectivamente, aos eixos x e y , L_2 é a espessura óptica do meio na direção y e ϕ e r são variáveis em coordenadas cilíndricas correspondentes aos eixos x e y . Maiores esclarecimentos podem ser obtidos no Apêndice supracitado.

Antes de incorporar a equação 3.26 na equação 3.21, deve-se perceber que, tratando-se de radiação solar, a temperatura do material teria de ser superior a 100 °C para que a emissão de corpo negro posua uma fração considerável de energia abrangida por esta banda. Em princípio, o coletor solar duopolimérico não atingirá este patamar

⁶Em inglês, *scattering phase function*.

de temperatura, portanto, este termo pode ser excluído da equação⁷. Desta maneira, incorporando as equações supracitadas

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{q}''_{r,S} = & -4\pi \int_{\lambda=0,25}^{2,5\mu\text{m}} \kappa_{\lambda} \left\{ \frac{1}{4} \int_{\phi_1}^{\phi_2} I(\eta_0, -1) S_2 \left[\frac{-(1+\zeta)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} \int_{\phi_3}^{\phi_4} I(\eta_0, 1) S_2 \left[\frac{(1-\zeta)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \right\} d\lambda \end{aligned} \quad (3.27)$$

Uma vez que considera-se o coeficiente de absorção como constante, pode-se realizar a integração das intensidades de radiação nas fronteiras, $I(\eta_0, -1)$ e $I(\eta_0, 1)$, na faixa de comprimento de onda mostrada, além de multiplicá-las por π , obtendo o poder emissivo destas, representado por E ,

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{q}''_{r,S} = & -\kappa_S \int_{\phi_1}^{\phi_2} E(\eta_0, -1) S_2 \left[\frac{-(1+\zeta)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \\ & -\kappa_S \int_{\phi_3}^{\phi_4} E(\eta_0, 1) S_2 \left[\frac{(1-\zeta)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi. \end{aligned} \quad (3.28)$$

As equações apresentadas até o momento para o fluxo radiativo aplicam-se para a radiação difusa. No caso da radiação direta, que é um fenômeno unidimensional, o divergente do fluxo radiativo de radiação direta resume-se à diferenciação do fluxo radiativo em somente uma coordenada. Sendo assim, temos que

$$\nabla \cdot \mathbf{q}''_{r,dir} = \frac{\partial I(S)}{\partial S} = -I(0) \kappa_S \exp(-\kappa_S S) \quad (3.29)$$

Trazendo para o sistema de coordenadas do problema em questão, a direção S relaciona-se com a direção do eixo y através do ângulo de propagação da radiação direta no polímero semitransparente, χ , como pode ser visto na figura 3.5. Matematicamente

$$S = \frac{y}{\cos \chi} \quad (3.30)$$

⁷Caso esta hipótese se prove inválida, o termo deve ser incluído.

e, substituindo na equação 3.29, obtém-se a seguinte fórmula

$$\nabla \cdot \mathbf{q}''_{r,dir} = -I(0) \frac{\kappa_S}{\cos \chi} \exp\left(-\frac{\kappa_S y}{\cos \chi}\right) \quad (3.31)$$

Por fim, a terceira interação da radiação solar com o polímero semitransparente é uma interação entre as superfícies do polímero e da água, onde haverá uma mudança de índice de refração. Diferentemente da interação na interface ar-polímero semitransparente, neste caso, a fração da radiação solar que é refletida na interface polímero-água deverá ser acompanhada, tendo em vista que a mesma retornará a propagar-se dentro do próprio polímero, que é objeto da análise. Este acompanhamento se dá até que a radiação solar seja extinguida, seja por sua atenuação ou por seu regresso ao ar. Comumente, este processo é computado por meio um dos seguintes métodos: traçado de raio⁸ ou radiação líquida⁹. Neste trabalho, optou-se por utilizar o método da radiação líquida. Por motivos de clareza, o mesmo só será explanado adiante, na subseção 3.2.6.

3.2.4 Água

Após atravessar o polímero semitransparente, a radiação solar atinge o volume de água. A água, assim como o polímero semitransparente, absorve e dispersa parte da radiação solar. Estes fenômenos podem ser avaliados teoricamente utilizando-se dos dados de coeficiente de atenuação espectrais para a água, juntamente com o espectro da radiação solar. Na literatura, encontraram-se três trabalhos com este método desenvolvido e as respectivas expressões para o cálculo da transmissividade de uma camada de água em função de sua espessura.

Kaushik *et al.* (1980), incrementando o modelo proposto por Rabl e Nielsen (1975) – ambos baseados em dados experimentais de transmitância para água marítima de Defant (1961) – sugeriram a seguinte equação advinda de um ajuste de curva – baseado na *Lei de Beer* – sobre os dados experimentais citados ao dividir o espectro solar em 5 bandas

⁸Em inglês, *ray-tracing method*.

⁹Em inglês, *net-radiation method*.

de comprimento de onda,

$$\begin{aligned} \tau_{\text{água}} = & 0,237 \exp(-0,032 X_{\text{água}}) + 0,193 \exp(-0,45 X_{\text{água}}) \\ & + 0,167 \exp(-3,0 X_{\text{água}}) + 0,179 \exp(-35,0 X_{\text{água}}) \quad (3.32) \\ & + 0,224 \exp(-225,0 X_{\text{água}}) \end{aligned}$$

onde $\tau_{\text{água}}$ é a transmissividade da camada de água, dada a sua espessura $X_{\text{água}}$, expressa em metros.

Tsilingiris (1988) utilizou um modelo numérico baseado nos coeficientes de atenuação para água pura¹⁰ de Jerlov (1968) e no espectro solar apresentado por Thekaekara (1976). A forma final da equação assemelha-se a equação 3.32, diferindo no fato de que os dados foram divididos em 19 bandas de comprimento de onda,

$$\begin{aligned} \tau_{\text{água}} = & 0,0466 \exp(-0,058 X_{\text{água}}) + 0,0290 \exp(-0,039 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0345 \exp(-0,025 X_{\text{água}}) + 0,0408 \exp(-0,018 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0413 \exp(-0,026 X_{\text{água}}) + 0,0400 \exp(-0,038 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0390 \exp(-0,055 X_{\text{água}}) + 0,0375 \exp(-0,081 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0375 \exp(-0,137 X_{\text{água}}) + 0,0367 \exp(-0,205 X_{\text{água}}) \quad (3.33) \\ & + 0,0360 \exp(-0,255 X_{\text{água}}) + 0,0350 \exp(-0,324 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0327 \exp(-0,425 X_{\text{água}}) + 0,0629 \exp(-1,33 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0548 \exp(-2,2 X_{\text{água}}) + 0,0476 \exp(-2,9 X_{\text{água}}) \\ & + 0,0263 \exp(-5,17 X_{\text{água}}) + 0,1530 \exp(-42,5 X_{\text{água}}) \\ & + 0,1676 \exp(-1800,0 X_{\text{água}}) \end{aligned}$$

Por fim, Janjai *et al.* (2000), também usando-se de um método numérico – todavia com os dados de coeficiente de atenuação para água de Palmer e Williams (1974) – computaram a transmitância da água em função da espessura de sua camada e representaram estes dados através da expressão que segue

$$\tau_{\text{água}} = 0,814897 - 0,07223 \ln(100 X_{\text{água}}) \quad (3.34)$$

Para facilitar a percepção das discrepâncias entre os modelos expostos acima, a figura 3.6 mostra os valores de transmissividade da

¹⁰Água pura, segundo Tsilingiris (1988), é água marítima filtrada cuidadosamente.

camada de água em função de sua espessura obtidos pelos três modelos.

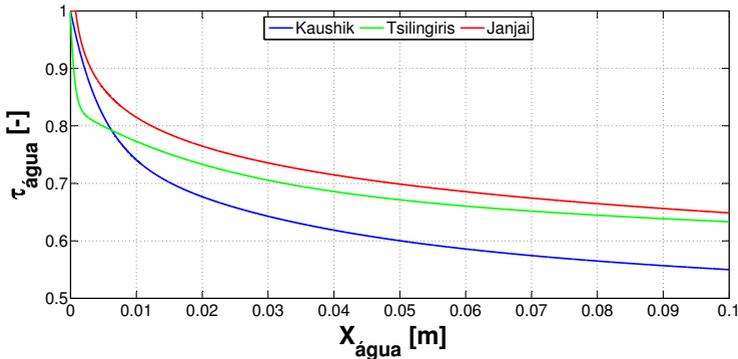


Figura 3.6: Transmitância de uma camada de água ($\tau_{\text{água}}$) em função de sua espessura ($X_{\text{água}}$).

Pode-se notar, para todos os modelos, o rápido decaimento nos primeiros centímetros de camada de água, onde a porção de onda longa do espectro é rapidamente absorvida. Após esta espessura, o efeito suaviza-se e a transmissividade da camada de água passa a ser, praticamente, uma função linear de sua espessura. Percebe-se, também, a forte concordância entre os modelos de Tsilingiris (1988) e Janjai *et al.* (2000) ao mesmo tempo que estes levemente destoam do modelo de Kaushik *et al.* (1980).

Sendo assim, tendo em vista a concordância entre dois modelos e optando-se pelo conservadorismo¹¹, adotou-se o modelo proposto por Janjai *et al.* (2000).

Nota-se que a espessura de camada da água para fins do cálculo da transmitância é uma função da geometria do coletor (altura do canal), assim como do ângulo de propagação da radiação na água (vide figura

¹¹Julga-se que uma maior transmitância da camada de água retrata um caso mais conservador, uma vez que a absorção direta da radiação solar pela camada de água é mais eficiente que uma absorção indireta por convecção com as paredes aquecidas do canal. Ressalta-se que nesta definição não são consideradas as perdas térmicas nem os efeitos de estratificação da camada de água.

3.5). Ou seja,

$$X_{agua} = \frac{H_{agua}}{\cos \psi} \quad (3.35)$$

onde H_{agua} é a altura do canal e ψ é o ângulo de propagação da radiação na água. Para a radiação difusa, utiliza-se a integração ponderada proposta pela equação 3.17:

$$\tau_{agua,dif} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin \theta \cos \theta \tau_{agua}(\theta) d\theta \quad (3.36)$$

A avaliação da transmitância da água se faz mandatória para a determinação do fluxo radiativo que alcança as superfícies do polímero opaco, no entanto, a matéria principal em estudo neste coletor solar é a própria água. Sendo assim, a transmitância da água também é necessária para avaliar o ganho de calor desta por absorção da radiação solar (tanto direta como difusa). Este ganho está inserido no termo de geração da primeira lei da termodinâmica. Em termos matemáticos

$$q'''_{agua} V = G_{b,agua} (1 - \tau_{agua,dir}) + G_{d,agua} (1 - \tau_{agua,dif}) \quad (3.37)$$

onde V é o volume de água, em m^3 , $G_{b,agua}$ é o fluxo radiativo de radiação direta incidente na camada de água (após as reflexões e atenuações já explanadas), em W , $G_{d,agua}$ é o fluxo radiativo de radiação difusa incidente na camada de água, em W , e $\tau_{agua,dir}$ e $\tau_{agua,dif}$ são as transmitância explanadas nesta seção.

3.2.5 Polímero opaco

Após a radiação solar ter entrado em contato tanto com o polímero semitransparente quanto com a água (e suas interfaces), esta, enfim, atinge o polímero opaco. A principal característica de um material opaco é a sua transmitância quase nula, significando que a radiação que o atinge tem somente duas alternativas: ser absorvida ou refletida.

A absortância para materiais opacos, da mesma forma que para uma interface de meios com índice de refração diferentes, é uma função do ângulo de incidência da radiação solar. Esta dependência angular não está disponível na literatura para a maioria dos materiais, contudo, Pettit e Sowell (1976) *apud* Duffie e Beckman (2013) sugeriram que

superfícies pretas comuns devem ter comportamento angular similar às superfícies seletivas, sendo assim, pode-se avaliar isto através da equação que segue,

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\alpha_n} = & 1 - 1,5879 \times 10^{-3} \theta + 2,7314 \times 10^{-4} \theta^2 - 2,3026 \times 10^{-5} \theta^3 \\ & + 9,0244 \times 10^{-7} \theta^4 - 1,8000 \times 10^{-8} \theta^5 + 1,7734 \times 10^{-10} \theta^6 \\ & - 6,9937 \times 10^{-13} \theta^7 \end{aligned} \quad (3.38)$$

onde α é a absorptância da superfície para um ângulo de incidência θ e α_n é a absorptância da superfície para um ângulo de incidência igual a zero (incidência normal). Esta equação pode ser vista, de forma gráfica, na Figura 3.7.

Assim como para a refletância, a absorptância para a radiação difusa é calculada pela integração dos valores de absorptância para a radiação direta ponderados adequadamente

$$\alpha_{dif} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin \theta \cos \theta \alpha(\theta) d\theta \quad (3.39)$$

Como dito, toda a radiação que não é absorvida pelo polímero opaco será, conseqüentemente, refletida. A radiação refletida ainda será do interesse deste trabalho, visto que a mesma pode ser novamente absorvida pela água ou pelo polímero semitransparente, assim como pode ser refletida em algumas das interfaces (ar-polímero semitransparente-água) e retornar ao próprio polímero opaco. No entanto, deve-se perceber que não necessariamente a radiação solar será refletida de forma especular no polímero opaco, assim como aconteceu para o polímero semitransparente. Normalmente, superfícies opacas não são tão lisas quanto as semitransparentes, fazendo com que a radiação sofra uma maior interferência com a mesma. Neste sentido, definiu-se, dentro deste trabalho, que a radiação solar que é refletida pela superfície opaca será tratada como difusa, isto é, terá distribuição uniforme em todas as direções.

Em resumo, haverá dois caminhos para a radiação solar após ter se deparado com a superfície opaca. O primeiro, no caso de esta ser refletida, será realizar o caminho de volta, ou seja, atravessar novamente a água e polímero semitransparente. E o segundo é ser absorvida pelo

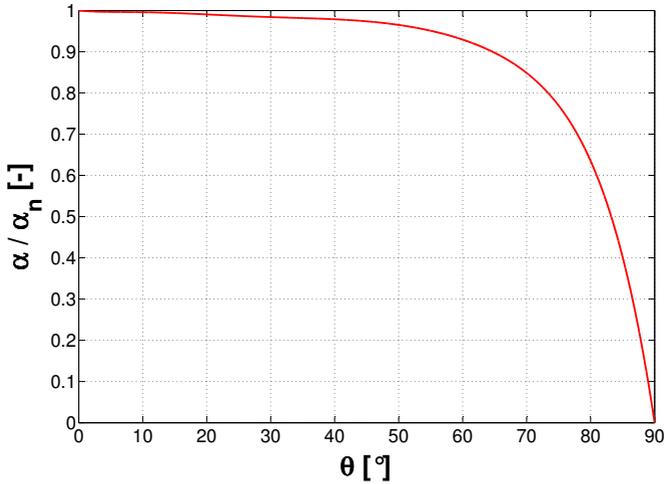


Figura 3.7: Razão da absorptância solar (α) e da absorptância solar em incidência normal (α_n) para uma superfície preta plana.

polímero opaco, fazendo com que este aumente a sua energia e, assim, a sua temperatura, o que nos leva aos fenômenos da condução e convecção. O acompanhamento do destino da radiação solar é assunto da seção seguinte.

3.2.6 Método da radiação líquida

Nas seções anteriores definiu-se as formas com que a radiação solar penetra e percorre o polímero semitransparente e a água até atingir o polímero opaco. Todavia, estas definições ficam claras somente para as primeiras interações da radiação solar com os meios citados, ficando nebulosas a partir deste ponto. O objetivo desta seção é esclarecer as trocas radiativas dentro do coletor solar até que esta venha a se extinguir ou retornar ao ar.

Conforme indicado em seção anterior, o método escolhido para avaliar estas trocas radiativas é o da radiação líquida. Este método consiste em, basicamente, resolver um sistema de equações que representa os intercâmbios radiativos que acontecem com as superfícies e meios envolvidos. De outra maneira, computa-se as frações da radiação que são absorvidas ou refletidas em uma superfície ou em um meio somadas à emissão tanto por parte das superfícies como do próprio meio.

Transformando esta explicação em termos matemáticos, tem-se, para uma superfície,

$$q = (\epsilon E + \rho G) - G \quad (3.40)$$

onde q é o calor cedido pela superfície (se negativo, significa que há calor sendo absorvido pela superfície), em W/m^2 , ϵ é a emitância, E é o poder emissivo, em W/m^2 , ρ é a refletância e G é o fluxo radiativo incidente, em W/m^2 .

Observado que as superfícies do domínio formam uma cavidade, é fácil perceber que o fluxo radiativo incidente em uma superfície é a soma dos fluxos radiativos emitidos e refletidos pelas outras superfícies e da radiação emitida pelo meio de propagação. Para o caso das interfaces entre meios distintos, o balanço energético radiativo recebe contribuições de ambos os meios – todavia, como é uma interface, a soma de todos os fluxos deve ser igual a zero. Posto isso, percebe-se que os fluxos radiativos estão todos interrelacionados, fechando, assim, o sistema de equações que há de ser resolvido simultaneamente.

Tendo exposto o conceito do método da radiação líquida, deve-se aferir as trocas radiativas entre as superfícies para que o sistema de equações seja construído. Primeiramente, para avaliar o fluxo radiativo de radiação difusa entre duas superfícies, utiliza-se o chamado fator de forma, ou fator de forma geométrico ¹². Estes fatores são as formas condensadas de equações mais complexas que relacionam o quanto uma superfície enxerga a outra e, tendo em vista que considera-se radiação difusa (que é uniformemente distribuída em todas as direções), assim, os fluxos radiativos entre elas. Em termos matemáticos, temos que o fator de forma entre duas superfícies diferenciais, $d1$ e $d2$, é dado por:

$$F_{d1 \rightarrow d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (3.41)$$

onde θ_1 é o ângulo entre as normais das superfícies diferenciais $d1$ e $d2$, θ_2 é o ângulo entre a normal da superfície diferencial $d2$ e a da $d1$ e S é a distância entre as duas áreas. Por conseguinte, o fator de forma para duas superfícies finitas, 1 e 2, é calculado pela integração da equação

¹²Em inglês, *geometric configuration factor*.

3.41 sobre as áreas em questão, resultando em

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (3.42)$$

A computação destes valores pode ser um pouco morosa; neste sentido, ressalta-se que fatores de forma para geometrias comuns são facilmente encontrados na literatura, evitando-se a necessidade de computá-los.

Isto posto, caso o meio em que a radiação se propaga fosse transparente, bastariam os fatores de forma para computar os fluxos radiativos entre as superfícies, já que o meio seria inerte. No entanto, dentro do escopo deste trabalho, contemplam-se meios semitransparentes, fazendo com que seja necessário a avaliação dos efeitos do meio sobre o fluxo radiativo que percorre uma superfície à outra. Estes efeitos são dois: a atenuação do fluxo radiativo (por absorção e dispersão) e a emissão do próprio meio. Os efeitos de dispersão, como dito, são desprezados nesta abordagem, assim, a atenuação do fluxo radiativo só se dá por meio de absorção. Já sobre a emissão do próprio meio, em se tratando de radiação solar e das temperaturas envolvidas em um coletor solar, estes efeitos são nulos. Resumidamente, tem-se que incluir o efeito da absorção do meio no cálculo do fator de forma, modificando a equação 3.42 para

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} \bar{t} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{t \cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 dA_1 \quad (3.43)$$

onde a variável t é a transmitância do meio, que é uma função do coeficiente de absorção e da distância entre as superfícies, e \bar{t} é chamada de transmitância média geométrica.

Rigorosamente, para que os efeitos de um meio participante sejam contemplados, há de se realizar a integração proposta na equação 3.43 para todas as superfícies envolvidas. Este processo pode se tornar bastante dispendioso e tornar uma análise demasiadamente complexa. À vista disso, deliberou-se pelo uso de uma simplificação para o cálculo da transmitância média geométrica, que é o uso do comprimento médio geométrico¹³, conforme sugerido por Howell *et al.* (2011). Em termos gerais, a definição do comprimento médio geométrico é como sendo o percurso médio da radiação difusa entre uma superfície e outra que

¹³Em inglês, *geometric mean beam length*.

resultará em um valor de transmitância igual a transmitância média geométrica. Matematicamente,

$$\bar{t} = t(\bar{r}) \quad (3.44)$$

onde, então, \bar{r} é o comprimento médio geométrico. Como dito, estes coeficientes são utilizados para simplificar o equacionamento dos fluxos radiativos em um meio participante, sem que haja perda considerável de precisão nesta avaliação.

Para o cálculo dos comprimentos médios geométricos utilizou-se as relações propostas por Dunkle (1964) para retângulos iguais paralelos e retângulos perpendiculares com uma aresta em comum. Para as superfícies que fogem a esta configuração, utiliza-se da álgebra dos fatores de forma, como explanado em Howell *et al.* (2011).

Por fim, dada a simplificação proposta para a simulação do coletor solar – simulação de somente um canal e extrapolação destes resultados para os demais – deve-se adotar uma condição de contorno para o caso das superfícies do polímero semitransparente que foram limitadas pela simplificação do uso de simetria. Procurando ao máximo refletir os efeitos que ocorrem na prática, decidiu-se por considerar estas superfícies fictícias como perfeitamente especulares e, ainda, com refletância igual a um. Esta condição de contorno permite que a radiação vinda das superfícies do polímero opaco e/ou da interface água-polímero semitransparente não retorne à estas sem que, primeiramente, tenham atingido a interface ar-polímero semitransparente. Além disto, esta condição de contorno pode ser facilmente verificada imaginando-se que a radiação que foi refletida especularmente, na realidade, retrata a radiação que viria dos canais adjacentes, conforme ilustra a figura 3.8.

Sendo assim, na avaliação dos fatores de forma, deve-se levar em consideração a existência destas duas superfícies especulares. Para isto, como apontado em Howell *et al.* (2011), usam-se os conceitos do método de traçado de raio e da construção de imagens. Imagens são as representações de uma superfície quando enxergada através de uma reflexão especular. De outra maneira, as imagens são superfícies virtuais enxergadas através de reflexões especulares e que, em termos práticos, representam o fenômeno adequadamente. Posto isso, o fator de forma de uma superfície a outra é, então, o fator de forma entre as duas superfícies somado com o fator de forma entre a superfície emissora e todas as imagens da superfície receptora, formadas através

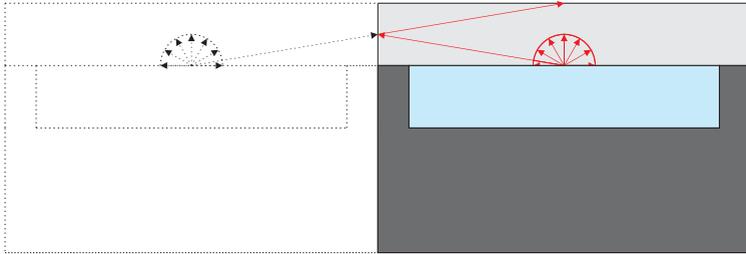


Figura 3.8: Ilustração do conceito da condição de contorno de superfície especular.

das superfícies especulares.

3.3 Condução

3.3.1 Polímeros semitransparente e opaco

Após o polímero opaco ter sido atingido pela radiação solar, as moléculas mais próximas de sua superfície terão a sua energia aumentada devido ao fenômeno da absorção. Como a radiação solar não penetra distâncias significativas dentro do material (inclusive sendo considerado um fenômeno de superfície), criam-se gradientes de temperatura que levam ao fenômeno da condução.

A condução é regida pela *Lei de Fourier*, que relaciona o vetor fluxo de calor, \mathbf{q}'' , ao gradiente de temperatura, ∇T , através de uma constante de proporcionalidade chamada de condutividade térmica, comumente representada pela letra k . Em forma de equação

$$\mathbf{q}'' = -k \nabla T \quad (3.45)$$

Tendo em vista que os polímeros semitransparente e opaco, muito provavelmente, possuem valores diferentes de condutividade térmica, deve-se utilizar uma formulação especial no acoplamento entre as duas superfícies, dentro do modelo de volumes finitos. Para isto, elegeu-se a formulação de média harmônica a fim de lidar corretamente com eventuais variações abruptas que possam existir entre os valores de condutividade térmica, evitando, assim, implicações errôneas (PATANKAR, 1980). Ressalta-se que nesta interface desconsiderou-se a existência de qualquer resistência de contato, isto é, supôs-se que há

um contato perfeito entre os dois materiais.

Adicionalmente, deve-se lembrar que a condutividade térmica pode ser uma função da temperatura, fazendo o material mais condutor ou mais isolante conforme este é aquecido ou resfriado. Apesar disto, levando em consideração que, normalmente, estas variações na condutividade térmica são muito pequenas, juntamente ao fato de que os polímeros não terão uma enorme variação em sua temperatura quando em operação, desconsiderou-se completamente este efeito.

Dito isto, ainda deliberou-se por considerar a condução nos polímeros semitransparente e opaco como um fenômeno bidimensional, isto é, desconsiderando a condução no eixo z – sentido do fluxo da água. Assim, a equação 3.45, simplifica-se para

$$\mathbf{q}'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \hat{\mathbf{i}} - k \frac{\partial T}{\partial y} \hat{\mathbf{j}} \quad (3.46)$$

Ademais adotou-se uma condição de contorno do tipo fluxo prescrito igual a zero nas laterais da seção do canal (onde estariam os canais adjacentes). Apesar de esta condição de contorno não ser exatamente fiel em todas as situações a que o coletor pode estar exposto, julgou-se esta como a mais plausível conceitualmente, respaldando a escolha.

3.3.2 Água

Tratou-se a camada de água como um único volume finito perante os eixos x e y , sendo discretizado somente na direção z . Isso implica que a condução nos eixos x e y será retratada internamente a um coeficiente de troca de calor por convecção – assunto da próxima seção – fazendo com que, de forma explícita, somente seja avaliada a condução no eixo z . Matematicamente, a equação 3.45, neste caso, reduz-se a

$$\mathbf{q}'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \hat{\mathbf{k}} \quad (3.47)$$

3.4 Advecção

3.4.1 Água

A derivada material da temperatura com relação ao tempo na primeira lei da termodinâmica contém internamente componentes que

contabilizam os efeitos advectivos. É facilmente percebível que somente a água possui estes termos.

Optando-se por tratar a água como um único volume finito perante os eixos x e y significa que não há termos advectivos a serem contabilizados nestes eixos¹⁴. Sendo assim, tem-se que

$$v \cdot \nabla T = w \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (3.48)$$

onde w é a velocidade da água no eixo z .

Para este caso, a condição de contorno, obviamente, é a temperatura de entrada da água.

3.5 Convecção

3.5.1 Água

Além dos gradientes de temperatura interiormente ao polímero opaco, há, da mesma forma, potencial de transferência de calor entre a superfície de polímero opaco em contato com a água, haja vista que há um gradiente de temperatura entre os dois meios.

Por se tratar de um líquido, quando se transfere calor do polímero opaco para a água através de condução, há a indução natural de um movimento de advecção na água ou, até mesmo, a água já pode estar em movimento – caso deste trabalho. Esta combinação de processos de condução e advecção resulta na troca de calor por convecção.

Apesar de parecer simples, a troca de calor por convecção é um processo complexo já que, como dito, este envolve os processos de condução e advecção, o que implica tratar da movimentação de um fluido, podendo acarretar considerações de efeitos de viscosidade, turbulência, entre outros. Apesar disto, felizmente, há, na literatura, uma base de equações empíricas para este fenômeno, abrangendo diferentes geometrias, fluidos de trabalho e condições de contorno.

Dito isto, levando em consideração as características do coletor solar deste trabalho, quais sejam: (i) dutos retangulares, (ii) água como fluido de trabalho e (iii) condições de contorno de fluxo de calor; procurou-se a correlação mais adequada. Segundo Kakac *et*

¹⁴Ressalta-se que foi uma deliberação do autor tratar a água como um único volume finito perante os eixos x e y . Sendo assim, esta hipótese não significa, de forma alguma, que não pode haver deslocamento de água nos eixos x e y internamente a este volume, mas, sim, que estes efeitos foram contabilizados internamente ao coeficiente de troca de calor por convecção.

al. (1987) *apud* Shah e Sekulić (2003), para um duto retangular com escoamento laminar plenamente desenvolvido – tanto térmica como hidraulicamente – e uma condição de contorno de fluxo de calor constante tanto axial como perifericamente, condição esta conhecida como $H2$, o número de Nusselt é dado pela fórmula

$$Nu = 8,235 (1 - 10,6044\alpha^* + 61,1755\alpha^{*2} - 155,1803\alpha^{*3} + 176,9203\alpha^{*4} - 72,9236\alpha^{*5}) \quad (3.49)$$

onde α^* é a razão de aspecto do duto retangular dada por

$$\alpha^* = \frac{b}{a} \quad (3.50)$$

sendo a a menor dimensão do duto, independente desta ser a largura ou a altura, e b a maior dimensão do duto. Lembrando que o número de Nusselt relaciona-se com o coeficiente de transferência de calor por convecção através da expressão

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3.51)$$

onde k é a condutividade térmica da água e D_h é o diâmetro hidráulico do duto que, para o caso de ser retangular, é calculado por

$$D_h = \frac{4ab}{2a + 2b} \quad (3.52)$$

É digno de nota relatar que deliberou-se pela premissa de escoamento plenamente desenvolvido haja vista, principalmente, não terem sido encontradas correlações empíricas adequadas para escoamentos em desenvolvimento, geometria retangular e condição de contorno em questão. Ainda, reiterou-se a decisão, principalmente, por esta ser conservadora, visto que o número de Nusselt é superior na região de entrada se comparado a região de escoamento plenamente desenvolvido.

3.5.2 Vento

O vento, um dos efeitos indiretos da absorção de radiação solar pelo globo terrestre, tem natureza aleatória, tornando difícil a sua caracterização, em termos teóricos, de uma forma simples e direta. Neste sentido, é comum optar por correlações empíricas para descrever o efeito deste sobre um coletor solar, nomeadamente, o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Tradicionalmente, utiliza-se a correlação proposta por McAdams (1954) *apud* Duffie e Beckman (2013),

$$h = 5,7 + 3,8V \quad (3.53)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em $W/(m^2 K)$, e V é a velocidade do vento, em m/s . Ou a sua modificação, sugerida por Watmuff *et al.* (1977), pela constatação de que, provavelmente, na correlação supracitada, os efeitos de resfriamento por convecção e radiação estariam misturados

$$h = 2,8 + 3,0V \quad (3.54)$$

No entanto, vale ressaltar que desenvolveram-se estas equações utilizando-se os dados obtidos por Jürges (1924), para uma placa de cobre com dimensões de $0,5\text{ m}$ por $0,5\text{ m}$ posicionada na vertical e com o escoamento também vertical e paralelo a esta. Dito isto, julgou-se inadequada a utilização das correlações citadas – 3.53 e 3.54 – tendo em vista a discrepância entre a situação simulada empiricamente e a ser simulada numericamente.

Analisando a literatura, encontraram-se três correlações desenvolvidas em ambientes externos e com dimensões do objeto de estudo compatíveis com a do coletor solar proposto.

Test *et al.* (1981) posicionaram uma placa aquecida de $1,220\text{ m}$ por $0,813\text{ m}$ em um ambiente externo e mediram a velocidade do vento a um metro de altura acima desta, obtendo a seguinte expressão

$$h = 8,55 + 2,56V \quad (3.55)$$

Ainda, Sharples e Charlesworth (1998) montaram uma placa aquecida de $1,81\text{ m}$ por $0,89\text{ m}$ diretamente em um telhado inclinado de uma construção doméstica e, medindo a velocidade do vento a um metro e

meio acima da placa, desenvolveram a correlação que segue

$$h = 6,5 + 3,3V \quad (3.56)$$

Por fim, Kumar e Mullick (2010) instalaram uma placa aquecida de 0,925 m por 0,865 m no telhado de uma construção de 8,33 m de altura. A medição da velocidade do vento foi feita a 0,15 m acima da placa e obtiveram a expressão que segue

$$h = 6,9 + 3,87V \quad (3.57)$$

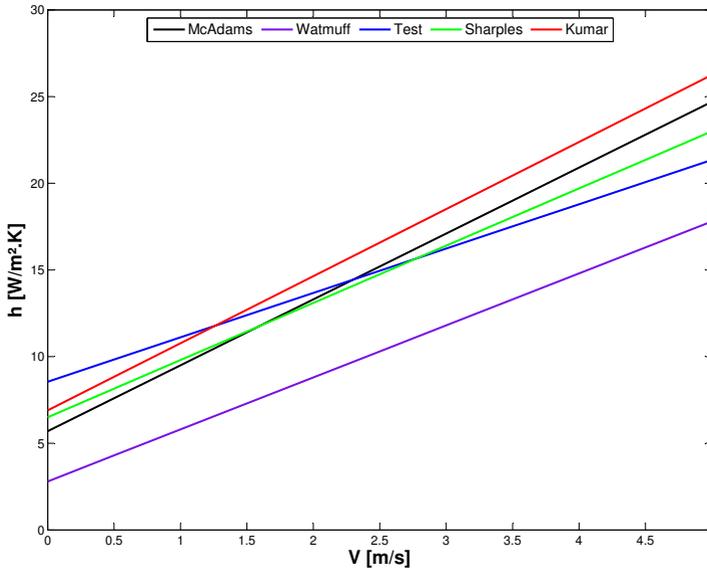


Figura 3.9: Coeficiente de transferência de calor por convecção em função da velocidade do vento.

Levando-se em consideração a dimensão estimada dos coletores duopoliméricos a serem estudados e a estrutura para ensaio de coletores ao alcance do autor, julgou-se a correlação de Kumar e Mullick (2010) como a mais conveniente a ser utilizada. Endossando a decisão, como pode ser visto na figura 3.9, a correlação de Kumar e Mullick (2010) é a que resulta, praticamente em toda a faixa de velocidade, no

maior coeficiente de transferência de calor, reforçando o conservadurismo das escolhas.

3.5.3 Ambiente

Além da transferência de calor por convecção com o vento, que ocorre na superfície superior do coletor solar, há também este mesmo tipo de fenômeno ocorrendo na parte inferior do coletor solar. No entanto, como esta parte está muito próxima do telhado, existe um bloqueio da ação do vento nesta superfície, alterando as características da movimentação de ar nesta região.

Supondo que o vento não surte efeito na camada de ar em questão, presume-se que nestas condições o ar estaria completamente estagnado. Esta afirmativa seria verdadeira, não fosse o efeito de convecção natural induzido pela presença da própria superfície inferior do coletor solar que, impreterivelmente, está mais quente que a temperatura ambiente.

Da mesma forma que os coeficientes de transferência de calor por convecção com o vento, optou-se pelo uso de correlações empíricas para caracterizar o coeficiente de transferência de calor por convecção com o ambiente. Analisando a situação em questão, escolheu-se a correlação proposta por Vliet e Ross (1975) *apud* Bejan (2004), a qual, para escoamento laminares é

$$Nu_y = \begin{cases} 0,55 Ra_{*y}^{\frac{1}{5}} & 10^5 < Ra_{*y} < 10^{13} \\ 0,17 Ra_{*y}^{\frac{1}{4}} & 10^{13} < Ra_{*y} < 10^{16} \end{cases} \quad (3.58)$$

onde Ra_{*y} é o número de Rayleigh para a posição y , dado por

$$Ra_{*y} = \frac{g\beta q''_w y^4}{\alpha \nu k}. \quad (3.59)$$

onde g é a constante gravitacional, em m/s^2 , β é o coeficiente de expansão térmica, em $1/K$, q''_w é o fluxo de calor, em W/m^2 , α é a difusividade térmica, em m^2/s , ν é a difusividade da quantidade de movimento, em m^2/s , e k é a condutividade térmica, em $W/(mK)$.

Destaca-se que as propriedades do ar são avaliadas na temperatura de filme, T_{filme} , que é a média entre a temperatura do ambiente,

T_{amb} , e a temperatura da superfície inferior, T_{inf} ,

$$T_{filme} = \frac{1}{2} (T_{amb} + T_{inf}) \quad (3.60)$$

onde as temperaturas são dadas em °C ou K.

3.6 Radiação térmica

Além das perdas de calor por condução seguida de convecção, nas superfícies superior e inferior, há também a perda por radiação para o ambiente. Este tipo de perda é análogo ao ganho de calor através da radiação solar, todavia estes efeitos antagônicos acontecem em faixas de comprimento de onda diferentes.

Para que essa interação seja computada, é necessário equacionar as trocas de calor que acontecem nas interfaces do polímero semitransparente – onde há tanto radiação térmica vinda do ambiente como da água – e também em seu interior – onde, em cada ponto da matéria, há radiação térmica sendo absorvida ao mesmo tempo que é emitida. Dito isto (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\mathbf{q}_r = \int_{\Omega=0}^{4\pi} I \mathbf{s} \, d\Omega \quad (3.61)$$

onde \mathbf{q}_r é o vetor fluxo radiativo, em W/m^2 , I é a intensidade de radiação, em $W/(m^2 \text{ sr})$, Ω é o ângulo sólido, em sr, e \mathbf{s} é o vetor unidade da direção relacionada ao ângulo sólido. O fluxo radiativo, que é, então, a intensidade de radiação integrada em todos os ângulos sólidos, na realidade, é composto por duas contribuições – tendo em vista que o meio é finito em alguma direção: a primeira é a intensidade de radiação que vem das fronteiras deste meio e a segunda é participação do próprio meio que, por possuir energia térmica, a irradia. Deste modo, para um ponto representado pelo vetor \mathbf{r} , tem-se (HOWELL *et al.*, 2011),

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(\mathbf{r}) = & \int_A I(\mathbf{r}_0) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)] \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^4} e^{-\beta|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \, dA_0 \\ & + \beta \int_V \hat{I}(\mathbf{r}^*) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}^*}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|^3} e^{-\beta|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|} \, dV^* \end{aligned} \quad (3.62)$$

onde \mathbf{r}_0 é o vetor posição de pontos localizados na fronteiras e \mathbf{r}^* é o vetor posição de pontos localizados no interior do meio.

Por ser extenso o desenvolvimento desta equação é apresentado no Apêndice C, onde, ao final, obtém-se a seguinte equação

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(\eta, \zeta) = & \pi \int_{\phi_1}^{\phi_2} I(\eta_0, -1) [-\cos \phi, -\sin \phi] S_3 \left[\frac{L_2}{2} (\zeta + 1) \csc \phi \right] d\phi \\ & + \pi \int_{\phi_3}^{\phi_4} I(\eta_0, 1) [-\cos \phi, -\sin \phi] S_3 \left[\frac{L_2}{2} (\zeta - 1) \csc \phi \right] d\phi \\ & - \pi \int_{\phi} \int_r \hat{I}(r, \phi) [\cos \phi, \sin \phi] S_2 [r] dr d\phi \end{aligned} \quad (3.63)$$

onde η e ζ são parâmetros adimensionais relacionados, respectivamente, aos eixos x e y , L_2 é a espessura óptica do meio na direção y e ϕ e r são variáveis em coordenadas cilíndricas correspondentes aos eixos x e y . Maiores esclarecimentos podem ser obtidos no Apêndice supracitado.

Por envolver uma integração dupla juntamente com um processo de interpolação para determinação do perfil de temperaturas, o uso da equação 3.63 para a determinação do fluxo radiativo ponto a ponto torna-se bastante moroso. Devido a isto, esta equação foi utilizada em pontos discretos para descrever, aproximadamente, os fluxos radiativos entre as superfícies e, por fim – aliada ao método da radiação líquida – estimar a perda radiativa da camada de água e do polímero semitransparente: parâmetros bastante significativos.

A fim de representar os divergentes dos fluxos radiativos ponto a ponto, mas de uma forma mais célere, optou-se pela utilização de um modelo simplificado. Para este caso, deliberou-se pelo uso do modelo de difusão de Rosseland. Este modelo aplica-se a meios opticamente espessos e parte do pressuposto que, sendo o meio espesso, a radiação propagar-se-á por pequenas distâncias até ser totalmente atenuada, isto é, restringindo-se, praticamente, a sua vizinhança. Sendo assim, neste caso, o processo de transferência de calor por radiação assemelha-se bastante com o por condução, premissa esta que é a base do modelo de difusão de Rosseland.

Dito isto, pode-se concluir que o fluxo radiativo pode ser repre-

sentado pela seguinte equação (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\mathbf{q}_r = -\frac{16}{3\beta_R} \sigma T^3 \nabla T \quad (3.64)$$

onde β_R é o coeficiente médio de atenuação de Rosseland e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A rigor, o coeficiente médio de atenuação de Rosseland é avaliado considerando a dependência espectral das propriedades ópticas do meio; como considerou-se estas constantes tanto na banda de radiação solar como na de radiação térmica, tem-se que (HOWELL *et al.*, 2011)

$$\beta_R = \kappa_T \quad (3.65)$$

onde κ_T é o coeficiente de absorção para a radiação térmica.

3.6.1 Temperatura do céu

Conforme dito, uma das condições de contorno necessárias é a radiação térmica vinda do ambiente, ou seja, do hemisfério celeste. O hemisfério celeste – ou céu – simplificadaamente, pode ser considerado como um corpo negro, tendo em vista que a radiação térmica advinda de uma superfície – no caso, o coletor solar – será completamente absorvida por este. Dito isto, resta avaliar o fluxo de radiação térmica deste para a superfície em estudo, fenômeno bastante complexo e que é resultante de uma enorme quantidade de variáveis, tais como: presença, tipo e quantidade de nuvens, composição da atmosfera local, existência de poluentes, aerossóis ou demais substâncias, e temperatura e umidade relativa do ambiente. Neste sentido, correlações empíricas foram desenvolvidas para caracterizar este fluxo de radiação térmica definindo-se uma temperatura equivalente do céu, isto é,

$$q''_{\text{céu}} = \sigma T_{\text{céu}}^4 \quad (3.66)$$

onde $q''_{\text{céu}}$ é o fluxo radiativo vindo do céu, em W/m^2 , σ é a constante de Stefan-Boltzmann, e $T_{\text{céu}}$ é a temperatura equivalente do céu, em K.

Dentre as disponíveis na literatura, optou-se pela seguinte corre-

lação (MARTIN; BERDAHL, 1984)

$$T_{c\acute{e}u} = T_{amb} [\epsilon_0 + 0,8(1 - \epsilon_0) C_{cobertura}]^{\frac{1}{4}} \quad (3.67)$$

onde $T_{c\acute{e}u}$ é a temperatura equivalente do céu, em K, T_{amb} é a temperatura ambiente, em K, ϵ_0 é a emissividade do céu quando este está limpo (sem nuvens), e $C_{cobertura}$ é o fator de nebulosidade do céu. A emissividade do céu é dada pela equação que segue

$$\begin{aligned} \epsilon_0 = & 0,711 + 0,0056 T_{p_0} + 0,000073 T_{p_0}^2 \\ & + 0,013 \cos \frac{2\pi t}{24} + 0,00012 (p_{atm} - p_0) \end{aligned} \quad (3.68)$$

onde T_{p_0} é a temperatura de ponto de orvalho, em °C, t é a hora do dia, p_0 é a pressão atmosférica ao nível do mar, em atm, e p_{atm} é a pressão atmosférica no local, em atm, calculada pela relação

$$p_{atm} = p_0 e^{\frac{g\rho_0 h}{p_0}} \quad (3.69)$$

onde g é a constante gravitacional ao nível do mar, em m/s^2 , ρ_0 é a densidade do ar ao nível do mar, em kg/m^3 e h é a elevação do local em relação ao nível do mar (altitude), em m.

Ainda, o fator de nebulosidade do céu é avaliado através da expressão que segue

$$C_{cobertura} = \left(1,4286 \frac{G_d}{G} - 0,3 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.70)$$

onde G_d é a irradiância difusa em uma superfície horizontal, em W/m^2 , e G é a irradiância global em uma superfície horizontal, em W/m^2 .

3.6.2 Polímero opaco

A superfície inferior tem contato direto com o ar ambiente, que é um meio não participante. Neste caso, a transferência de calor por radiação é representada de forma simples e dada pela seguinte equação

$$q = \alpha \sigma T_{amb}^4 - \epsilon \sigma T_{sup,pos}^4 \quad (3.71)$$

onde α é a absorptância e ϵ é a emitância da superfície para a radiação térmica, e $T_{sup,pos}$ é a temperatura da superfície inferior, em K.

3.7 Comentários finais

Apesar da simulação numérica dos fenômenos que ocorrem em um coletor solar ser elementar, a vasta gama de modelos matemáticos e sua necessidade de acoplamento torna este processo um pouco mais complexo.

Neste capítulo, explanou-se os modelos matemáticos empregados para a simulação numérica do coletor solar duopolimérico. Vale ressaltar, conforme dito no corpo do texto compreendido neste capítulo, que, por vezes, os modelos empregados foram escolhidos tendo em vista o conservadorismo (isto é, resultando na obtenção de um desempenho inferior), assim como a viabilidade de trabalhar com este (principalmente, o tempo de simulação).

Enfim, o autor registra aqui a sua ciência destes pontos, além das demais limitações do modelo.

4 Simulação Numérica

Através dos modelos matemáticos expostos no capítulo anterior, construiu-se um algoritmo computacional possibilitando a comunicação entre os mesmos com o intuito de obter o perfil térmico do coletor solar e, por meio deste, avaliar o seu desempenho térmico. A ideia geral deste algoritmo é análoga a uma colcha de retalhos, onde cada retalho seria, neste caso, um modelo matemático, e a colcha – o resultado da união de todos os retalhos – é o algoritmo.

O capítulo em questão abordará, nesta ordem: os dados de entrada necessários para a simulação numérica, o fluxograma geral do algoritmo para a resolução do problema proposto e, por fim, uma análise dos erros numéricos advindos dos parâmetros de discretização da malha e do critério de convergência entre iterações.

4.1 Dados de entrada

Como dito no início do capítulo anterior, prezou-se por manter os modelos matemáticos do coletor solar duopolimérico o mais detalhados possível, isto é, buscando utilizar somente informações que estão disponíveis na literatura – e não advindos de ensaios experimentais com protótipos.

Fora estas informações, também são evidentemente necessárias as condições de contorno para a resolução do problema e que, dentro desta análise, são, basicamente, as condições cronológicas e meteorológicas em que o coletor solar está exposto, além da própria geometria e disposição deste.

Buscando apresentar de forma concisa os parâmetros necessários para a simulação numérica, a tabela 4.1 elenca os mesmos e os classifica em grupos, facilitando a compreensão.

Nota-se, confirmando o exposto nesta seção, que os dados de entrada se resumem a informações bastante elementares e que seriam mandatórias para a resolução de qualquer problema similar.

Tabela 4.1: Dados de entrada para a simulação.

Classe	Variável
Geometria	Largura do canal
	Espessura das paredes
	Espessura da camada de polímero opaco
	Espessura da camada de água
	Espessura da camada de polímero semitransparente
	Comprimento da canal
Disposição	Inclinação do coletor
	Azimute do coletor
	Altitude do local
	Latitude do local
Malha	Volumes por milímetro para largura
	Volumes por milímetro para altura
	Volumes por metro para comprimento
Propriedades Termofísicas	Condutividade térmica do polímero semitransparente
	Condutividade térmica do polímero opaco
Propriedades Ópticas	Índice de refração do polímero semitransparente
	Coefficiente de absorção de radiação solar do polímero semitransparente
	Coefficiente de absorção de radiação térmica do polímero semitransparente
	Índice de refração da água
	Absortância em incidência normal do polímero opaco
	Emitância hemisférica do polímero opaco
Cronologia	Mês
	Dia
	Hora
Meteorologia	Temperatura do ambiente
	Umidade relativa do ambiente
	Velocidade do vento
Radiação Solar	Irradiância direta
	Irradiância difusa
Operação	Temperatura de entrada da água
	Fluxo mássico

4.2 Procedimento de simulação

Claramente, o primeiro procedimento a ser realizado pelo algoritmo é a leitura dos dados de entrada.

O segundo passo é a avaliação das variáveis que permanecerão constantes durante a simulação numérica, evitando, assim, que estas sejam recomputadas desnecessariamente durante a execução do algoritmo, o que degradaria a eficiência deste processo. Neste sentido, lembra-se que o coletor solar é simulado em regime permanente, o que implica que as condições de contorno, obviamente, não variam durante a análise

Começa-se pela determinação das variáveis triviais para a análise. Utilizando-se dos dados cronológicos (hora, dia e mês) e da disposição do coletor (inclinação, azimute e latitude), calculam-se os ângulos de incidência, θ , e o de azimute solar, γ_s . Cruzando estes ângulos com a geometria do coletor solar (largura do canal e altura da camada de água) e as propriedades ópticas (índice de refração do polímero semitransparente e da água) determinam-se as áreas sombreadas para a radiação direta, a serem utilizadas em um momento posterior. Ainda nesta primeira fase, calcula-se – com os dados de disposição (altitude do coletor solar), meteorologia (temperatura e umidade relativa do ambiente) e de radiação solar (irradiância direta e difusa) – a temperatura do céu, usada para a determinação das perdas por radiação térmica.

O próximo passo contempla diretamente os dados de radiação solar (irradiância direta e irradiância difusa), que são as forças motrizes do aquecimento da água do coletor solar. Tratando cada componente da radiação solar adequadamente, calculam-se os fluxos radiativos que atingirão as diferentes partes do polímero opaco (topo das nervuras do canal, laterais do canal e fundo canal). Para isto, utilizam-se os ângulos já computados, as propriedades ópticas dos meios (índices de refração e coeficientes de absorção do polímero semitransparente e da água, e absorvância do polímero opaco) e a geometria do coletor solar (espessura do polímero semitransparente e altura da água); recordando que as partes sombreadas não recebem contribuição de radiação direta, somente de difusa. Com estes mesmo dados, calcula-se o divergente dos fluxos radiativos da radiação solar para o polímero semitransparente e a absorvância da água¹, representando o ganho de energia por estes materiais.

Entrando na equação que é o cerne do modelo matemático (pri-

¹A absorvância da água é igual a unidade menos a transmitância da mesma, como apresentado pela equação 3.37.

meira lei da termodinâmica) e usando os dados de geometria, discretização de malha e propriedades termofísicas, elabora-se a matriz de coeficientes que relacionam as transferências de calor por condução entre os volumes finitos dos polímeros semitransparente e opaco com as devidas condições de contorno (de condução). Tendo em vista que a condutividade térmica não é variável, esta matriz mantém-se constante durante toda a simulação numérica. Tem-se ciência que esta matriz, neste momento, está incompleta, contudo, optou-se por construir a matriz de coeficientes global como a soma de algumas matrizes de coeficientes, cada qual representando um fenômeno isolado. Deste modo, além da matriz de coeficientes para a condução, serão construídas matrizes de coeficientes para a convecção com a água, convecção com o ambiente (nas superfícies superior e inferior), advecção na água e difusão radiativa no polímero semitransparente. Deliberou-se por esta abordagem no sentido de reduzir o tempo de simulação, visto que a maior matriz de coeficientes, que é a referente a condução, é constante durante toda a análise.

Ressalta-se que esta matriz abrange uma seção do canal, já que, como dito no capítulo anterior, desprezou-se a condução no eixo z . Isto leva a determinação do perfil de temperaturas em seções perpendiculares ao canal, em que a determinação do perfil de temperatura de uma seção é indiretamente conectada a seção subsequente através da condição de contorno da temperatura da água.

Após o cálculo dos parâmetros que permanecerão constantes durante a análise, chega-se a rotina principal da simulação numérica. Utilizando-se do perfil térmico da iteração atual (caso seja a primeira, desconsidera-se esta operação), atualizam-se os valores de temperatura e fluxo de calor das superfícies superior e inferior, a fim de recalcular os coeficientes de transferência de calor por convecção para estas duas superfícies. Quando recalculados os coeficientes, estes dados são utilizados para montar a matriz de coeficientes de convecção com o ambiente.

Analogamente, o processo de atualização do coeficiente de transferência de calor por convecção da água é conduzido da mesma maneira, considerando a alteração de sua temperatura. Após a atualização, elabora-se a matriz de coeficientes de convecção com a água. Ainda, esta mesma modificação na temperatura afeta os termos advectivos da água, o que leva a compilação da respectiva matriz de coeficientes.

Novamente, a atualização do perfil térmico do polímero semitransparente fará necessário o recálculo de todos os valores da condu-

tividade térmica de Rosseland e, assim, a recomputação da matriz de coeficientes que trata deste fenômeno.

Enfim, após ter todas as matrizes de coeficientes atualizadas, estas são somadas e salva-se a versão final para a posterior resolução do novo perfil térmico.

Além das matrizes de coeficientes, deve-se atualizar os parâmetros que fazem parte do vetor independente. Neste caso, há três parâmetros a serem atualizados, quais sejam: perda por radiação térmica da água, perda por radiação térmica do topo da nervura do canal e perda por radiação térmica da superfície inferior. Para calcular os dois primeiros valores, utilizam-se as equações desenvolvidas a fim de equacionar os fluxos radiativos de radiação térmica e que são relacionados através do método de radiação líquida. Tendo sido avaliada a situação, as perdas por radiação térmica são o resultado da diferença entre o fluxo radiativo que sai da superfície em questão e o que chega a esta mesma superfície. De maneira similar, mas muito mais simples, a perda por radiação térmica da superfície posterior é o balanço energético entre a radiação térmica do ambiente que a superfície é capaz de absorver e a que esta emite para o ambiente. Computados os valores, monta-se o vetor independente atualizado.

Finalmente, atualizados tanto a matriz dos coeficientes como o vetor independente, utiliza-se um método de resolução para a obtenção do perfil térmico que, obviamente, será o perfil térmico atualizado.

Comparando-se o perfil térmico atualizado com o perfil térmico antigo, calcula-se a diferença de temperatura ponto a ponto entre estes. A maior diferença de temperatura (em termos absolutos, °C ou K) entre uma iteração e outra é a considerada para o critério de convergência. Caso o critério de convergência tenha sido atendido, encerra-se a simulação da seção e, desde que a seção em questão não seja a última, prossegue-se para a próxima; caso contrário, reinicia-se o processo percorrido nesta seção (todavia, como comentado, limitando-se aos parâmetros que variam), até que o critério de convergência seja atendido.

O procedimento de simulação percorrido nos parágrafos acima pode ser visto, de forma gráfica, na figura 4.1, que contempla um fluxograma do mesmo.

4.3 Ferramenta e métodos computacionais

O *software* utilizado para o desenvolvimento do algoritmo computacional foi Matlab (MATHWORKS, 2011).

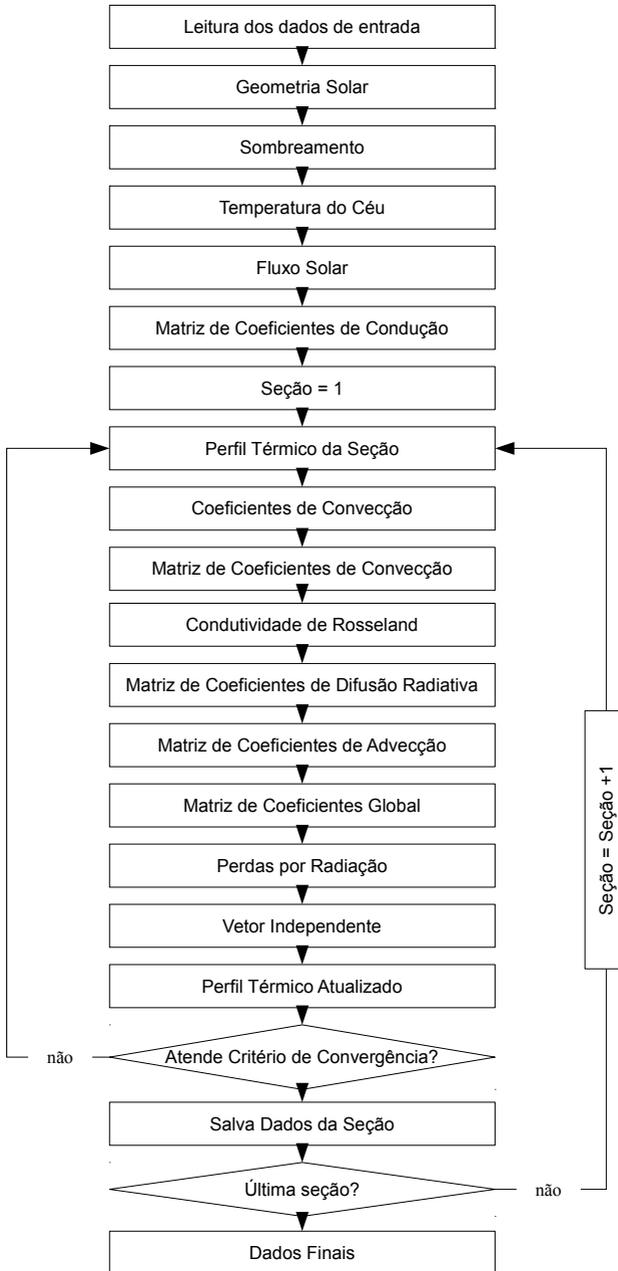


Figura 4.1: Fluxograma do procedimento de simulação numérica.

A escolha do mesmo foi baseada em alguns pontos fortes considerados importantes pelo autor. Primeiramente, a ferramenta em questão tem lógica vetorial, fazendo com que, caso o algoritmo computacional seja confeccionado adequadamente, exista um potencial enorme de ganho em velocidade de simulação. O processo de adequação do algoritmo computacional à lógica vetorial da ferramenta, chamado de vetorização, foi conduzido no algoritmo computacional e aprimoramentos significativos foram alcançados na construção das matrizes de coeficientes.

Em segundo lugar, o *software* contém, em sua base, um grande número de funções disponíveis, tais como métodos numéricos de interpolação, integração e inversão de matrizes, facilitando a resolução das equações.

Por fim, existe um pacote para impressão de dados e curvas em gráficos, cuja interface gráfica é bastante amigável, facilitando a confecção destes, assim como a sua estética.

Tratando-se dos métodos computacionais, optou-se por padrões para cada tipo de operação. Para integrações simples, dois métodos foram utilizados: quadratura adaptativa de Gauss-Kronrod (função *quadgk*) e quadratura adaptativa recursiva de Simpson (função *quadv*); a primeira foi utilizada para integrações que não envolviam a vetorização de sua operação, ao passo que a segunda é justamente o oposto. Já para as integrações duplas, utilizou-se um método numérico disponível na base do Matlab (função *quad2d*). O método de interpolação unidimensional foi baseado na interpolação de uma curva cúbica nos dados (função *interp1*, com a opção *spline*) e para o caso bidimensional fez-se uma interpolação truncada, assumindo que o valor é sempre igual ao ponto mais próximo deste (função *interp2*, com a opção *nearest*). Por fim, utilizaram-se dois métodos de resolução para a inversão de matrizes: o primeiro é o de inversão (função *inv*), exclusivo para a primeira iteração de cada seção, uma vez que este é bastante robusto, e, para as iterações seguintes, o método utilizado foi o de gradiente biconjugado estabilizado (função *bicgstabl*), que oferece mais rapidez ao processo.

Apesar de não estar explícito no texto, analisou-se o efeito das tolerâncias adotadas para as resoluções numéricas e concluiu-se que os valores adotados como padrão pelo Matlab são suficientes para garantir a qualidade dos resultados das simulações.

4.4 Erros de origem numérica

Definido o algoritmo, assim como a sua lógica, buscou-se avaliar as implicações dos parâmetros que definem a discretização das equações envolvidas (malha), assim como o critério de convergência entre iterações. Deste modo, os parâmetros são quatro: discretização da malha no eixo x , discretização da malha no eixo y , discretização da malha no eixo z e critério de convergência entre iterações.

A discretização da malha tanto no eixo x como no eixo y é dada de forma relativa: número de volumes por milímetros. Optou-se por esta maneira, posto que adiante – no capítulo 6 – as dimensões da geometria do coletor serão variadas, a fim de observar os efeitos desta sobre o desempenho do mesmo. Quando isto ocorrer, objetiva-se manter a mesma qualidade de malha adequando o número de volumes para a nova dimensão. Da mesma maneira, a discretização da malha no eixo z é em termos relativos, no entanto, definida como o número de volumes por metro, observado que a escala de dimensão é outra frente aos eixos x e y . Por fim, o último parâmetro é o critério de convergência entre iterações e que, como explanado, é um valor absoluto, em °C ou K.

Para estes três parâmetros arbitraram-se valores entediados como extremamente rígidos com o intuito de obter resultados que são uma marca de referência² para as simulações posteriores com valores mais brandos para esses mesmos parâmetros. O objetivo de testar valores mais brandos é reduzir o tempo de simulação sem comprometer a qualidade dos resultados; em linhas gerais, trata-se de uma otimização da própria simulação, ponderando os gastos (tempo dispendido) frente aos ganhos (qualidade de simulação). A tabela 4.2 resume os valores para os parâmetros do caso base, assim como os outros valores avaliados.

A geometria e os materiais selecionados para definição dos dados de entrada da simulação foram escolhidos baseados no protótipo de coletor solar construído e que será detalhado no capítulo 5. Da mesma forma, as condições cronológicas, meteorológicas e de radiação solar foram selecionadas de acordo com critérios estabelecidos por normas específicas para o teste de coletores; este procedimento também será explicado no próximo capítulo. De qualquer forma, os dados em questão podem ser vistos no Apêndice D. Importante, neste momento, é ter em mente que foram simulados 49 diferentes pontos, visando caracterizar os erros de origem numérica em todo o espectro de condições a que o coletor solar pode estar sujeito.

²Em inglês, *benchmark*.

Tabela 4.2: Parâmetros da análise.

Parâmetro	Unidade	Base	Avaliados		
			1E-5	1E-4	1E-3
Critério de Convergência	K	1E-6	1E-5	1E-4	1E-3
Discretização no eixo x	Volumes/mm	20	10	5	2
Discretização no eixo y	Volumes/mm	20	10	5	2
Discretização no eixo z	Volumes/m	50	25	10	5

A metodologia aplicada para a avaliação dos erros numéricos é a de comparação de indicadores relevantes da situação proposta e que, naturalmente, são afetados pela variação dos quatro parâmetros citados. Neste sentido, definiram-se sete indicadores para acompanhar durante as simulações, quais sejam: temperatura de saída da água ($T_{sai,agua}$), eficiência do coletor solar (η), perda de calor por convecção na superfície superior ($\dot{q}_{conv,sup}$), perda de calor por convecção na superfície inferior ($\dot{q}_{conv,inf}$), perda de calor por radiação na superfície inferior ($\dot{q}_{rad,inf}$), perda de calor por radiação no topo das nervuras ($\dot{q}_{rad,neru}$) e perda de calor por radiação no polímero semitransparente ($\dot{q}_{rad,p.st}$)³. Ainda, acompanhou-se o tempo de simulação, $t_{simulacao}$, para mensurar o ganho na rapidez de simulação. Nota-se que nenhum indicador acompanhado relaciona-se ao ganho de calor, tendo em vista que estes são muito pouco, senão nada, afetados pela discretização de malha, assim como pelo critério de convergência. Também é importante registrar que a comparação dos parâmetros com o caso base deu-se de duas formas: para a temperatura de saída da água e para a eficiência, foram comparados os valores absolutos, e para os fluxos de calor, computou-se a diferença em forma percentual. Escolheu-se esta maneira posto que a comparação de duas temperaturas de forma relativa não possui significado físico e, como a eficiência já se trata de uma porcentagem, a redundância é evidente.

Definida a metodologia, o primeiro parâmetro a ser avaliado foi o critério de convergência. Avaliou-se, além do caso base, os valores de 1E-5, 1E-4 e 1E-3. Ressalta-se que, neste momento, os parâmetros são avaliados isoladamente, isto é, ao variar o critério de convergência para, por exemplo, 1E-4, os valores da discretização da malha nos eixos x e y e no eixo z permanecem constantes (respectivamente, 10

³Uma ilustração destas perdas de calor pode ser vista no capítulo 6, figura 6.1.

volumes por mm e 50 volumes por m). Dito isto, a tabela 4.3 resume as discrepâncias encontradas frente ao caso base.

Tabela 4.3: Análise de erros numéricos advindos do critério de convergência entre as iterações.

Parâmetro	1E-5		1E-4		1E-3	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
$T_{sai,agua}$ [K]	0,000	0,000	-0,001	0,004	-0,001	0,014
η [-]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
$\dot{q}_{conv,sup}$ [%]	-0,003	0,001	-0,006	0,046	-0,010	1,095
$\dot{q}_{conv,inf}$ [%]	-0,026	0,011	0,017	0,448	0,060	1,480
$\dot{q}_{rad,inf}$ [%]	-0,004	0,004	-0,006	0,076	-0,005	0,286
$\dot{q}_{rad,nerov}$ [%]	0,000	0,000	0,000	0,007	-0,004	0,003
$\dot{q}_{rad,p,st}$ [%]	-0,001	0,001	-0,010	0,019	-0,013	0,196
$t_{simulacao}$ [%]	-20,1		-69,4		-82,6	

Vê-se que os parâmetros mais afetados foram os referentes a perda de calor por convecção, ao passo que as perdas por radiação mantiveram-se bastante estáveis. Todavia, de qualquer forma, todos estes parâmetros não tiveram variação significativa, sempre inferior a 1,5 %. Da mesma forma, a temperatura de saída da água teve uma variação máxima de cerca de 0,01 K, o que se traduziu em um ganho de eficiência de 0,001. Percebe-se que a adoção de um critério de convergência menos restritivo culminou, como um todo, em uma superestimativa do perfil térmico do coletor solar, uma vez que tanto as perdas de calor como a temperatura de saída da água (e, conseqüentemente, a eficiência) aumentaram; novamente, mesmo assim, as diferenças foram irrisórias. No entanto, o ganho de tempo foi considerável, sendo este de, pelo menos, 20 %, podendo chegar a mais de 80 %. Haja vista que não houveram variações consideráveis entre os casos analisados, optou-se pelo caso com maior agilidade de simulação, isto é, o valor de $1E-3$, para o parâmetro de critério de convergência.

O segundo parâmetro analisado foi a discretização no eixo x . Para isto, mantidos os outros parâmetros do caso base, simulou-se o coletor solar para os pontos supracitados com os valores de discretização de 10, 5 e 2 volume por milímetro. Os resultados foram comparados ao caso base, os quais podem ser observados na tabela 4.4.

É claramente visível que uma discretização inferior a 5 volumes por milímetro começa a causar erros bastante consideráveis na análise. Para a discretização de 2 volumes por milímetro a eficiência do coletor

Tabela 4.4: Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo x .

Parâmetro	10		5		2	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
$T_{sai,agua}$ [K]	-0,020	-0,010	-0,051	-0,028	-0,166	-0,085
η [-]	-0,002	-0,001	-0,005	-0,004	-0,016	-0,011
$\dot{q}_{conv,sup}$ [%]	-0,393	-0,027	-2,112	-0,099	-4,153	-0,262
$\dot{q}_{conv,inf}$ [%]	-0,503	-0,027	-0,055	-0,055	-4,049	-0,220
$\dot{q}_{rad,inf}$ [%]	-0,081	-0,019	-0,179	-0,040	-0,649	-0,155
$\dot{q}_{rad,nerov}$ [%]	-0,074	-0,027	-0,146	-0,058	-0,627	-0,270
$\dot{q}_{rad,p.st}$ [%]	-0,027	-0,011	-0,116	-0,035	-0,254	-0,092
$t_{simulacao}$ [%]	-18,7		-67,2		-93,4	

solar é subestimada em pouco mais de 0,01, ao mesmo tempo que os fluxos convectivos podem ser subestimados em cerca de 4 %. Visto isso, buscando-se a manutenção da qualidade dos resultados numéricos, mas, também, obter uma redução no tempo de simulação, deliberou-se pelo valor de 5 volumes por milímetro para as simulações posteriores.

Analogamente, analisou-se a discretização no eixo y usando os mesmos valores examinados para a discretização no eixo x . O resumo dos resultados dos casos simulados é exposto na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo y .

Parâmetro	10		5		2	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
$T_{sai,agua}$ [K]	-0,038	0,003	-0,074	0,005	-0,183	0,012
η [-]	-0,004	0,000	-0,007	0,000	-0,017	0,001
$\dot{q}_{conv,sup}$ [%]	0,634	1,045	1,332	2,183	3,364	5,467
$\dot{q}_{conv,inf}$ [%]	0,072	1,352	3,963	3,963	0,865	11,993
$\dot{q}_{rad,inf}$ [%]	0,040	0,228	0,160	0,667	0,519	1,998
$\dot{q}_{rad,nerov}$ [%]	0,015	0,027	0,055	0,171	0,225	0,727
$\dot{q}_{rad,p.st}$ [%]	0,109	0,341	0,215	0,589	0,526	1,275
$t_{simulacao}$ [%]	-48,1		-82,3		-93,0	

Apesar de efeitos mais suaves nos fluxos radiativos, percebe-se que a discretização no eixo y é mais impactante nos fluxos convectivos, uma vez que é no eixo y que se encontram os fortes gradientes intrasólido. Sendo assim, uma discretização grosseira de malha nesta direção pode, normalmente, acarretar uma superestimativa de até 12 % nos

fluxos convectivos e que, ao final, impactam negativamente a eficiência em quase 0,02. Prezando pela manutenção de um patamar mínimo de qualidade, balanceado com o tempo de simulação, optou-se pela discretização de 5 volumes por milímetro para o eixo y .

Por fim, avaliou-se o quarto, e último, parâmetro: discretização no eixo z . Foram estudados os valores de 25, 10 e 5 volumes por metro. A compilação destes resultados pode ser vista na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Análise de erros numéricos advindos da discretização da malha no eixo z .

Parâmetro	25		10		5	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
$T_{sai,agua}$ [K]	-0,001	0,001	-0,004	0,004	-0,017	0,009
η [-]	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,002	0,001
$\dot{q}_{conv,sup}$ [%]	-0,021	0,004	-0,158	0,018	-0,584	0,042
$\dot{q}_{conv,inf}$ [%]	-0,270	0,071	0,183	0,183	-2,037	0,105
$\dot{q}_{rad,inf}$ [%]	-0,005	0,029	-0,028	0,109	-0,098	0,228
$\dot{q}_{rad,nev}$ [%]	-0,001	0,003	-0,007	0,011	-0,028	0,024
$\dot{q}_{rad,p.st}$ [%]	-0,002	0,003	-0,015	0,010	-0,056	0,024
$t_{simulacao}$ [%]	-42,2		-71,2		-84,2	

Observa-se, evidentemente, que os indicadores são, de certa forma, insensíveis. A maior variação da eficiência, mesmo para o caso menos exigente, foi uma subestimativa em 0,002. As perdas de calor também estiveram nesta linha, onde somente a perda por convecção na superfície inferior destoou levemente, atingindo um valor subestimado de mais de 2%. Considerando este panorama, escolheu-se o valor de 5 volumes por metro para o parâmetro de discretização no eixo z , haja vista a considerável redução – de mais de 80% – no tempo de simulação.

Resumindo, levando em conta o discorrido nesta seção, os valores escolhidos para os parâmetros a serem utilizados para as simulações posteriores são apresentados na tabela 4.7, juntamente com os valores do caso base para fins de comparação.

Deliberados os valores para os parâmetros, novamente, rodou-se uma simulação a fim de comparar os efeitos conjuntos da variação de todos os parâmetros frente aos indicadores analisados. O resumo dos resultados pode ser visto na tabela 4.8. Observados os dados, vê-se que a temperatura da água é subestimada em, no máximo, cerca de 0,1 K, o que pode significar uma redução de até pouco mais de 0,01 na eficiência do coletor. Adicionalmente, as perdas de calor situam-se entre uma

Tabela 4.7: Comparação de parâmetros entre o caso base e o caso aprimorado.

Parâmetro	Unidade	Base	Aprimorado
Critério de Convergência	K	1E-6	1E-3
Discretização no eixo x	Volumes/mm	20	5
Discretização no eixo y	Volumes/mm	20	5
Discretização no eixo z	Volumes/m	50	5

superestimativa de 2,9% e uma subestimativa de 1,8%. Em resumo, as perdas em qualidade de simulação são pequenas, principalmente, levando em consideração a enorme redução no tempo de simulação, de 140.495 s para 483 s (ou de 39,0 h para 0,13 h).

Tabela 4.8: Erros numéricos para o caso aprimorado.

Parâmetro	Caso Otimizado	
	mín	máx
$T_{sai,agua}$ [K]	-0,114	-0,034
η [-]	-0,011	-0,004
$\dot{q}_{conv,sup}$ [%]	-0,405	1,307
$\dot{q}_{conv,inf}$ [%]	-1,796	2,896
$\dot{q}_{rad,inf}$ [%]	0,258	0,400
$\dot{q}_{rad,nerov}$ [%]	-0,124	0,081
$\dot{q}_{rad,p.st}$ [%]	0,112	0,566
$t_{simulacao}$ [%]	-99,7	

5 Ensaio Experimental

Nos capítulos 3 e 4 descreveu-se a elaboração da ferramenta de simulação numérica para a avaliação do desempenho térmico do coletor solar duopolimérico. Visando endossar os resultados desta ferramenta, construiu-se um protótipo do coletor solar¹ a fim de comparar os resultados compilados em um ambiente numérico com os obtidos experimentalmente.

Neste capítulo, serão descritos o protótipo construído, os equipamentos utilizados no ensaio experimental, os tratamentos realizados nos dados adquiridos e o modelo de regressão utilizado para a obtenção da curva de desempenho do coletor solar.

5.1 Protótipo

O protótipo construído consistiu, basicamente, em uma placa de polietileno preto de ultra-alto peso molecular (UHMW-PE) e uma placa de policarbonato (PC), ambas de comprimento de 1.200 mm e largura de 1.020 mm, sendo que a placa de UHMW-PE tem uma espessura de 25 mm e a de PC, 5 mm.

Usinou-se (por fresamento) a placa de UHMW-PE a fim de obter os canais por onde a água flui – em número, 30 - assim como os cabeçotes inferior e superior, responsáveis por distribuir o fluxo de água que entra e recolher o que sai. A comunicação dos cabeçotes com a tubulação da bancada foi posicionada diagonalmente (também chamado de fluxo em Z), a fim de obter uma melhor distribuição do fluxo da água, além de confeccionar os mesmos com um grande volume em relação ao volume dos canais para, da mesma forma, assegurar a homogeneidade do fluxo de água nos canais.

As dimensões arbitradas para os canais foram de 1.000 mm para o comprimento, 25 mm para a largura e 5 mm para a altura. Estas foram

¹Reforça-se o agradecimento a Irmãos Fischer S.A. pelo fornecimento dos polímeros e dos serviços de usinagem, fundamentais para a construção do protótipo.

baseadas na área total de coletores solares convencionais, ao mesmo tempo em que buscou-se reduzir a altura do mesmo, isto é, fazê-lo mais fino. Para separar cada canal, julgou-se suficiente uma parede de espessura de 5 mm (doravante especificada como nervura).

Para que as placas fossem unidas, optou-se pela maneira mais elementar: parafusos. Neste sentido, usinaram-se furos tanto na placa de UHMW-PE como na de PC. Os furos (passantes) da placa de PC foram usinados para não ter contato com a rosca do parafuso, ao passo que os furos (não passantes) da placa de UHMW-PE foram usinados na dimensão sugerida por tabelas específicas para que a rosca fosse feita pelo próprio parafuso (ABNT (2005a) e ABNT (2005b)). Haja vista o espaço ocupado pelo sistema de fixação (parafusos), as nervuras projetadas para acomodar este foram fabricadas com uma largura maior que as nervuras convencionais (10 mm *versus* 5 mm), usadas somente para separação dos fluxos de água dos canais adjacentes. Optou-se por uma fileira com sistema de fixação a cada 5 canais, sendo que cada fileira é composta de 40 parafusos M4 equidistantes.

Os parafusos supracitados encarregam-se de unir as placas em sua área central. Já para as bordas, o mesmo sistema foi usado, contudo com parafusos maiores, M5, e num total de 174 unidades. Ainda, para se certificar da vedação entre as placas nas áreas de borda, foi usinada uma canaleta para a acomodação de um *o-ring*; as dimensões desta foram obtidas em tabelas próprias (ISO, 2008).

Outros detalhes construtivos são: (i) uso de arruelas em todos os parafusos, acomodando melhor as tensões e evitando o desgaste precoce do material, (ii) uso de silicone de alta temperatura (de cor preta) nos parafusos centrais para, analogamente ao *o-ring*, garantir a vedação completa.

O protótipo ainda foi fixado em cima de uma telha metálica de duas camadas, isto é: chapa metálica, poliestireno expandido e chapa metálica; simulando o coletor solar instalado no telhado de uma residência.

5.2 Equipamentos

A bancada utilizada para os ensaios experimentais desenvolvidos neste trabalho é a disponível no LEPTEN/LabSolar (Laboratório de Energia Solar), da Universidade Federal de Santa Catarina. Uma imagem do protótipo do coletor solar duopolimérico sendo ensaiado na mesma pode ser vista na figura 5.1.

A bancada em questão é em circuito fechado, isto é, não há fluido entrando ou saindo do sistema, este é todo recirculado. Logo após a



Figura 5.1: Protótipo do coletor solar duopolimérico durante o ensaio experimental na bancada do LEPTEN/LabSolar.

saída do coletor solar, a água adentra uma bomba hidráulica, que é a responsável pela circulação do fluido. Após ser bombeada, a água pode ser resfriada através de um trocador calor, cujo fluido frio é produzido por um *chiller*. Neste ponto, objetiva-se atingir uma temperatura tão próxima quanto, mas ainda inferior, à temperatura configurada (pelo usuário) como sendo a de entrada. Depois desta etapa, mede-se a temperatura da água e através de aquecedores de passagem (resistências elétricas) realiza-se um ajuste fino em sua temperatura para, então, esta ser encaminhada à um reservatório térmico, chamado de reservatório de homogeneização. Este tem a função de garantir a estabilidade da temperatura durante a realização do ensaio. Após deixar o reservatório, a água flui para o coletor solar e, pouco antes de adentrar o mesmo, mede-se a sua temperatura, definindo a temperatura de entrada para análises posteriores. Em seguida, ao passo que a água percorre os canais do coletor e é aquecida, as grandezas meteorológicas são medidas, quais sejam: irradiância solar global no plano do coletor, irradiância solar difusa no plano do coletor, temperatura e umidade relativa do ambiente, e velocidade do vento. Por fim, ao deixar o coletor solar, afere-se novamente a temperatura da água, a fim de estabelecer a temperatura de saída. Em resumo, por meio das variáveis medidas, é possível avaliar o incremento de temperatura da água proporcionado

pelo coletor solar, dadas as condições de operação e meteorológicas. Um esquema da bancada descrita pode ser visto na figura 5.2.

5.3 Procedimentos de ensaio

Conforme indicado pela ABNT (2009), existem dois procedimentos de ensaio para coletores solares: em regime permanente (*steady-state*) e em regime quase-dinâmico (*quasi-dynamic*) – ou condições quase-dinâmicas. Os dois ensaios possuem respaldo normativo, técnico e acadêmico; é possível encontrar na literatura trabalhos que fazem a comparação dos parâmetros de desempenho obtidos para um mesmo coletor solar através dos dois procedimentos, como, por exemplo, o trabalho de Fischer *et al.* (2004).

O procedimento de ensaio em regime permanente consiste, naturalmente, em obter condições de regime permanente expondo o coletor às condições meteorológicas. Para que a condição de regime permanente seja atingida, condições meteorológicas bastantes específicas tem de ser atendidas, tanto de valores em si, como de variação das mesmas. Já o procedimento de ensaio em regime quase-dinâmico avalia o coletor solar em condições meteorológicas muito mais variadas, posto que as condições meteorológicas em que este pode ser estudado são muito mais abrangentes que o procedimento em regime permanente. Será explanado adiante que para que isto seja possível, as equações utilizadas para caracterizar o desempenho do coletor solar são modificadas. Sumarizando o exposto neste parágrafo, as restrições para ambos os procedimentos podem ser vistas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Restrições de condições de operação para os procedimentos de ensaio.

Parâmetro	Unidade	Permanente		Quase-Dinâmico	
		Valor	Desvio	Valor	Desvio
G	W/m^2	>700	± 50	>300 <1100	-
θ	$^\circ$	<20	-	-	-
f_{dif}	%	<30	-	-	-
T_{amb}	$^\circ C$	-	± 1	-	-
u_{vento}	m/s	3 ± 1	-	-	-
$T_{ent,agua}$	$^\circ C$	-	$\pm 0,1$	-	± 1
\dot{m}	$kg/s.m^2$	0,02	$\pm 1\%$	0,02	$\pm 1\%$

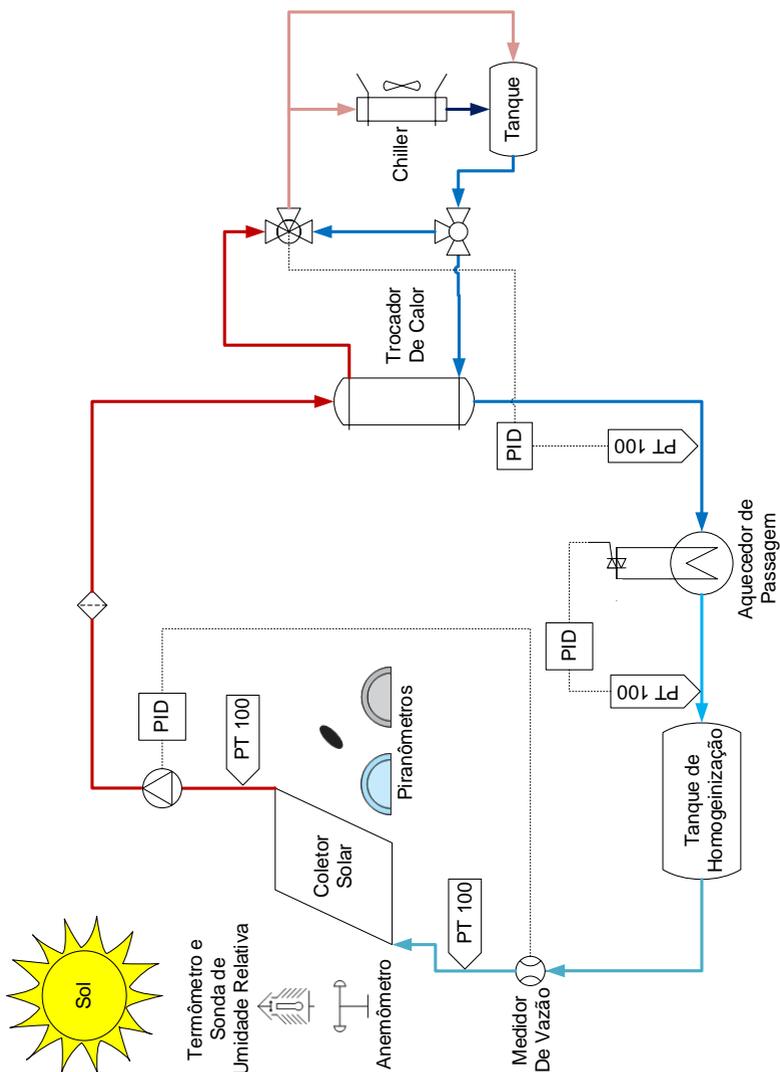


Figura 5.2: Esquema da bancada do LEPTEN/LabSolar utilizada para os ensaios experimentais do protótipo do coletor solar duopolimérico.

É consenso geral que o procedimento de ensaio quase-dinâmico possibilita a caracterização mais detalhada do coletor solar, além de ser mais flexível para com condições exógenas ao ensaio (lê-se condições meteorológicas). Sendo assim, aderindo-se ao procedimento de ensaio quase-dinâmico permite aos interessados que se obtenha uma caracterização do desempenho térmico de coletores solares em um período mais curto, haja vista que a influência das condições meteorológicas é consideravelmente reduzida. Ainda, a adoção deste procedimento permite um maior aproveitamento de uma mesma bancada. Enfim, dadas todas estas considerações, optou-se pelo uso do procedimento de ensaio em regime quase-dinâmico.

Os ensaios foram conduzidos desde o mês de julho até o mês de dezembro do ano de 2012. Antes do início efetivo dos ensaios, tem-se uma fase de pré-acondicionamento do coletor solar (e até, da bancada). Para isto, todos os equipamentos da bancada foram devidamente ligados e configurou-se uma temperatura de entrada. Buscando evitar quaisquer implicações errôneas, oriundas do início da atuação dos controladores das variáveis de interesse, deixou-se a bancada funcionar ininterruptamente durante, pelo menos, 12 h antes do início da aquisição dos dados a serem utilizados.

Nesta fase, a única consideração a ser levada em conta, observada a norma técnica ABNT (2009), é o tempo de intervalo entre as aquisições de dados, ou o tempo de amostragem. Segundo a norma, este intervalo deve estar entre 1 s e 6 s; no ensaio realizado deliberou-se pelo tempo de amostragem de 6 s.

5.4 Tratamento dos dados

Tendo sido concluída a fase de realização do ensaio experimental, todos os dados adquiridos devem ser devidamente tratados para verificar a sua consistência, assim como a sua aplicabilidade nos procedimentos e modelos de regressão.

Primeiramente, são feitas médias de todos estes dados agrupando-os em períodos de tempo definidos. Estes períodos podem ser de 5 min a 10 min (ABNT, 2009); neste trabalho, optou-se pelo tempo de média de 5 min.

Após o universo de dados crus (ou brutos) ter sido condensado em dados ponderados, estes são submetidos a alguns filtros. Os dados ponderados devem respeitar algumas restrições, cuja maior parte já foi exposta na tabela 5.1: (i) irradiância global superior a 300 W/m^2 , mas inferior a 1100 W/m^2 , (ii) temperatura de entrada da água estável

em ± 1 K, (iii) diferença entre a temperatura de saída e a temperatura de entrada da água superior a 1 K, (iv) fluxo mássico² de $0,02 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ e estável em $\pm 1 \%$, (v) velocidade do vento superior a 1 m/s. Caso qualquer uma destas restrições não seja satisfeita, o dado ponderado é prontamente descartado.

Feito o tratamento de dados, os dados ponderados qualificados são anotados para que os mesmos sejam utilizados, posteriormente, na etapa de regressão dos resultados. O Apêndice E apresenta um resumo, de forma gráfica, destes dados.

5.5 Regressão

A técnica de regressão consiste em achar constantes de proporcionalidade entre uma gama de variáveis de entrada (independentes) e uma variável de saída (dependente) específica. No caso de coletores solares, busca-se determinar a sua eficiência, que é definida como a razão entre o calor que é transferido à água (calor útil) e o calor disponível, que é o irradiado na superfície do coletor, isto é,

$$\eta = \frac{q_{\text{util}}}{GA} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}} c_{p,\text{agua}} (T_{\text{sai,agua}} - T_{\text{ent,agua}})}{GA} \quad (5.1)$$

onde q_{util} é o calor útil, \dot{m}_{agua} é a vazão mássica de água no coletor solar, $c_{p,\text{agua}}$ é o calor específico da água, $T_{\text{sai,agua}}$ é a temperatura da água na saída do coletor, $T_{\text{ent,agua}}$ é a temperatura da água na entrada do coletor, G é a irradiância global e A é a área do coletor.

Sendo assim, abrangidos na ABNT (2009), existem alguns modelos de regressão, cuja diferença são as variáveis de entrada, uma vez que a variável de saída de interesse sempre será a eficiência do coletor. Os dois modelos mais comuns são o de perda linear e o de perda quadrática, os quais foram escolhidos para serem abordados neste trabalho.

O modelo de perda linear tem as perdas de calor representadas por um termo somente, cuja relação com a diferença de temperaturas,

²A área nesta unidade é referente à área do coletor solar, isto é, recomenda-se um fluxo de $0,02 \text{ kg/s}$ para cada m^2 de coletor solar (ABNT, 2009); por exemplo, para um coletor solar de $1,5 \text{ m}^2$, o fluxo recomendado é de $0,03 \text{ kg/s}$.

como o próprio sugere, é linear. A sua forma mais geral é a que segue:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{ref} - T_{amb})}{G} \quad (5.2)$$

onde $F_R(\tau\alpha)$ é o parâmetro que representa o calor passível de ser absorvido pelo coletor solar, $F_R U_L$ é o parâmetro que indica as perdas de calor lineares com a diferença de temperatura e T_{ref} é uma temperatura de referência para as perdas de calor. Existem duas temperaturas utilizadas como sendo a de referência para a caracterização de coletores solares: a temperatura de entrada da água e a temperatura média do coletor; o valor da primeira é óbvio, já o da segunda é um pouco ambíguo a primeira vista. A temperatura média do coletor é, na realidade, uma média entre a temperatura de entrada e de saída da água, conforme a equação 5.3. A escolha da temperatura a ser utilizada como sendo a de referência é uma arbitragem do interessado. Não havendo consenso geral entre a adoção de uma ou outra, para esta análise, deliberou-se pelo uso da temperatura média do coletor por acreditar que esta melhor caracteriza os dois níveis energéticos em que há transferência de calor. Dito isto, inclui-se a última igualdade na equação 5.3.

$$T_m = \frac{1}{2}(T_{sai,agua} + T_{ent,agua}) = T_{ref} \quad (5.3)$$

Analogamente, o modelo de perda quadrática é o que tem as suas perdas representadas por um termo cuja relação com a diferença de temperaturas é quadrática. Neste caso, a equação combina um termo de relação linear juntamente com um termo de relação quadrática para representar das perdas. Sua forma mais geral é a que segue

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{ref} - T_{amb})}{G} - F_R U_{L,T} \frac{(T_{ref} - T_{amb})^2}{G} \quad (5.4)$$

onde $F_R U_{L,T}$ é o parâmetro que indica as perdas de calor referentes a diferença de temperatura quadrática. As mesmas explicações com relação a temperatura de referência, T_{ref} , aplicam-se a esta equação.

As equações apresentadas – 5.2 e 5.4 – tem como dados de entrada somente a irradiância global, as temperaturas da água (ou só a temperatura de entrada, conforme escolha da temperatura de referência) e a

temperatura do ambiente. Entretanto, concorda-se que tratar as radiações direta e difusa da mesma maneira pode levar a erros na avaliação da eficiência de um coletor solar, principalmente quando a fração de radiação difusa é elevada. Desta maneira, uma opção é a inserção de coeficientes de correção no parâmetro $F_R(\tau\alpha)$, a fim de adequá-lo para a radiação direta ou difusa, isto é,

$$F_R(\tau\alpha) = F_R(\tau\alpha) K_b(\theta) \frac{G_b}{G} + F_R(\tau\alpha) K_d \frac{G_d}{G} \quad (5.5)$$

onde $K_b(\theta)$ é a correção para a radiação direta – sendo esta, ainda, uma função do ângulo de incidência – e K_d é a correção para a radiação difusa. Nota-se que, ao passo que separou-se as componentes da radiação solar, faz-se necessário a ponderação da participação destas, motivo pelo qual constam as razões G_b/G e G_d/G .

Como dito, K_b é uma função do ângulo de incidência. Uma expressão geral sugerida para esta dependência é (ABNT, 2009):

$$K_b(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (5.6)$$

No entanto, esta expressão foi construída baseada em coletores de placa plana vidro-metálicos, fazendo com que sua aplicabilidade para o coletor duopolimérico possa ser questionável. Por este motivo, não determinou-se, *a priori*, uma expressão para a dependência da correção para a radiação direta com o ângulo de incidência, mas arbitrou-se esse valor como constante em algumas faixas discretas de valores de ângulo de incidência, conforme sugerido por Perers (1997).

Por fim, para que as equações apresentadas possam ser aplicadas em um procedimento de ensaio em regime quase-dinâmico, há de se incluir um termo para considerar os efeitos de condições transientes no mesmo, caracterizando adequadamente os momentos em que o coletor está esquentando ou esfriando (normalmente, nas primeiras horas da manhã e últimas horas da tarde, respectivamente). Para isto, inclui-se um termo com a derivada da temperatura de referência no tempo, e cuja constante de proporcionalidade é chamada de capacitância térmica efetiva, $(mC)_e$. Este termo, em linhas gerais, corrige a eficiência instantânea do coletor, ao passo que, por exemplo, nas primeiras horas da manhã, a energia solar coletada não é somente utilizada para esquentar a água, mas também para esquentar o próprio coletor solar, fazendo com que a eficiência instantânea do coletor seja subestimada;

o contrário é observado nas últimas horas da tarde.

Sumarizando o exposto, as formas finais das equações 5.2 e 5.4 são, respectivamente:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) K_b(\theta) \frac{G_b}{G} + F_R(\tau\alpha) K_d \frac{G_d}{G} - F_R U_L \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - \frac{(mC)_e}{G} \frac{dT_m}{dt} \quad (5.7)$$

e

$$\eta = F_R(\tau\alpha) K_b(\theta) \frac{G_b}{G} + F_R(\tau\alpha) K_d \frac{G_d}{G} - F_R U_L \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - F_R U_{L,T} \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G} - \frac{(mC)_e}{G} \frac{dT_m}{dt} \quad (5.8)$$

Apresentadas as equações a serem utilizadas, deve-se empregar um método de regressão para que os coeficientes sejam inferidos. Primeiramente, percebe-se que um método de regressão linear pode ser empregado, visto que as equações apresentadas podem ser representadas da seguinte maneira

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = \mathbf{X}\mathbf{a} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \dots \quad (5.9)$$

onde \mathbf{y} é o vetor com os valores da variável de saída, o vetor \mathbf{a} contém os parâmetros de desempenho do coletor (objeto da regressão) e a matriz \mathbf{X} contém os dados de entrada da regressão, que são as variáveis independentes das equações apresentadas.

Para estimar os parâmetros do coletor, o método mais habitual é o método dos mínimos quadrados³, em que minimiza-se a soma do quadrado dos erros para alcançar a melhor combinação de parâmetros. O erro é definido como a diferença entre o valor da variável de saída medido, ou o vetor \mathbf{y} , subtraído do valor da variável de saída obtido pelas variáveis de entrada e os parâmetros da regressão, ou a multiplicação da matriz \mathbf{X} pelo vetor \mathbf{a} . Segundo Montgomery e Runger (2003), este problema pode ser solucionado matricialmente,

³Em inglês, *least square method*.

resolvendo a expressão

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (5.10)$$

A simplicidade do método dos mínimos quadrados é contrabalançada por suas considerações conceituais, entre as quais, que todos os dados medidos e, por conseguinte, seus pontos, possuem o mesmo nível de incerteza. Já que isto, na realidade, não ocorre, este método pode tratar de maneira errada alguns pontos que tem um comportamento que se desvia da média de incerteza do grupo de dados. Mathioulakis *et al.* (1999) e Kratzenberg *et al.* (2006) abordam este assunto e sugerem a utilização do método dos mínimos quadrados ponderados⁴ para minimizar o problema em questão. Este método inclui, em cada dado, a sua incerteza própria, que é a junção de incertezas do tipo A, advindas de erros aleatórios inerentes a medição de uma variável, e do tipo B, cuja fonte é a precisão do equipamento de medição⁵. Com isto, cada dado é ponderado por sua incerteza (por isto o nome do método), fazendo com que dados com menor incerteza tenham mais relevância perante a regressão que os dados com maior incerteza. Estes efeitos são adicionados na avaliação dos parâmetros por meio da inclusão de uma matriz contendo os dados de incerteza; esta é chamada de matriz de ponderação, \mathbf{W} . Sendo assim, a equação 5.10 modifica-se para (MONTGOMERY; RUNGER, 2003)

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}'\mathbf{W}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{W}\mathbf{y} \quad (5.11)$$

Tendo em vista os benefícios da utilização do método de mínimos quadrados ponderados para a regressão dos dados de ensaio experimental, optou-se pelo mesmo para obtenção dos parâmetros de desempenho do coletor solar.

5.6 Resultados

Finalmente, após os dados terem sido tratados e, com estes, realizada a regressão – procedimentos abordados nas últimas duas seções – obtém-se os parâmetros do coletor solar, os quais podem ser vistos

⁴Em inglês, *weighted least square method*.

⁵A maneira de cálculo das incertezas não será abordada neste texto, mas pode ser estudada através dos trabalhos, já citados, de Mathioulakis *et al.* (1999) e Kratzenberg *et al.* (2006), além de Metrology (2008).

na tabela 5.2, tanto para o modelo de perda linear como o de perda quadrática.

Tabela 5.2: Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente.

Parâmetro	Unidade	Modelo	
		Linear	Quadrático
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{0^\circ-15^\circ}$	-	0,830	0,814
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{15^\circ-30^\circ}$	-	0,834	0,818
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{30^\circ-45^\circ}$	-	0,839	0,813
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{45^\circ-60^\circ}$	-	0,842	0,806
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{60^\circ-75^\circ}$	-	0,891	0,840
$F_R(\tau\alpha) K_d$	-	0,970	0,907
$F_R U_L$	$W/m^2.K$	24,37	19,52
$F_R U_{L,T}$	$W/m^2.K^2$	-	0,232
$(mC)_e$	$J/m^2.K$	37.033,7	36.388,7

Os 5 primeiros parâmetros, todos $F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)$ com um subscrito, indicam a quantidade de energia oriunda de radiação direta e que é absorvida pela água, dado o ângulo de incidência. Conforme comentado anteriormente, é sugestão de Perers (1997) a divisão do parâmetro de correção para radiação direta em faixas de ângulo de incidência; neste caso, optou-se por dividir em faixas de 15° . Pode ser visto que não há um parâmetro para a faixa de 75° a 90° , isto se dá pela ausência de dados qualificados (após o devido tratamento) com estes valores. De qualquer maneira, o aproveitamento de radiação direta situa-se na casa dos 80% para ângulos de incidência de até 60° para o modelo de perda quadrática, ao passo que esses valores são um pouco maiores para o modelo de perda linear. Isto se dá, como será visto, pela superestimativa do parâmetro de perda de calor, fazendo com que, igualmente, o parâmetro de ganho de calor tenha que ser superestimado; isto é uma limitação deste modelo, não havendo formas de mitigar os efeitos observados. Apesar das discrepâncias entre os modelos, é visível o aumento do parâmetro de ganho de calor por radiação direta para grandes ângulos de incidência. Este comportamento bastante contra-intuitivo é conhecido para coletores sem cobertura e que, normalmente, são poliméricos. Perers (1997) mostra um gráfico com os fatores de correção para radiação direta em função do ângulo de incidência para variadas configurações de coletor solar em que está explícito este tipo de comportamento; o gráfico em questão é replicado na figura 5.3. Sendo assim, apesar de excêntrico, o comportamento é,

de certa forma, esperado.

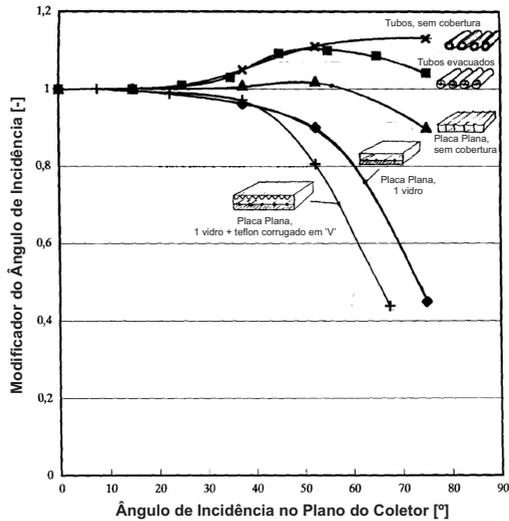


Figura 5.3: Fatores de correção, K_b , em função do ângulo de incidência para várias configurações de coletor solar. Adaptado de Perers (1997).

O parâmetro seguinte, $F_R (\tau\alpha) K_d$, é análogo ao parâmetro abordado no parágrafo acima, mas para a radiação difusa. Vê-se que, para ambas as equações, a absorção de radiação difusa é maior que para a radiação direta, principalmente quando em pequenos ângulos de incidência. Este comportamento é explicado pelos valores crescentes do parâmetro $F_R (\tau\alpha) K_b(\theta)$ com o aumento do ângulo de incidência, já que, conforme Duffie e Beckman (2013), a radiação difusa tem um ângulo de incidência equivalente de, aproximadamente, 60° . De qualquer forma, é digno de nota que, devido às pressões hidrostáticas, a cobertura de PC sofreu um leve abaulamento na região entre cada par de sistemas de fixação; mesmo que esta deformação não tenha sido muito pronunciada, a mesma pode ter contribuído para estes resultados.

Os próximos parâmetros, $F_R U_L$ e $F_R U_{L,T}$, contrariamente aos já comentados, tratam da perda de calor. $F_R U_L$ é o parâmetro que representa as perdas de calor de um coletor solar relacionadas linearmente com a diferença entre a temperatura de referência e a temperatura do ambiente, ao passo que $F_R U_{L,T}$ é relacionado de forma quadrática. Evidentemente, só é possível a comparação dos valores de $F_R U_L$ entre os

modelos linear e quadrático, já que, no primeiro, não existe o termo que inclui $F_R U_{L,T}$. Vê-se que há uma diferença considerável entre os valores, contudo, isto é esperado, haja vista que, pela falta de flexibilidade, o modelo linear acaba por superestimar o seu parâmetro de perda de calor a fim de adequar-se a todo a faixa de operação. Desta maneira, a forma mais intuitiva de verificar estas discrepâncias é de forma gráfica, observando a figura 5.4.

Por fim, o último parâmetro representa a inércia térmica do coletor solar, termo presente somente no procedimento de ensaio em regime quase-dinâmico, e que, verdadeiramente, é o que permite que o coletor solar possa ser testado em tais condições. Este termo, normalmente, não é bastante discutido em análises de desempenho térmico, sendo assim, limita-se dizer que há uma boa concordância no mesmo entre os modelos linear e quadrático.

Utilizando-se dos parâmetros obtidos pela regressão, pode-se traçar a curva normalizada de desempenho, conforme explica ABNT (2009); para isto, utilizam-se os dados de entrada descritos na tabela 5.3. Este procedimento é realizado para que a curva de desempenho obtida no procedimento de ensaio em regime quase-dinâmico possa ser comparada, de forma justa, à obtida em regime permanente. O resultado, de forma gráfica, pode ser visualizado na figura 5.4.

Tabela 5.3: Dados de entrada para a curva normalizada de desempenho.

Dado de Entrada	Unidade	Valor
G	W/m ²	1000
f_{dif}	%	15
θ	°	15
dT/dt	K/s	0

Deve-se ter em mente que os resultados apresentados até o momento são fruto de média de valores, o que define os resultados como P50, isto é, estes são os valores mais prováveis de cada variável, contudo, há uma probabilidade de 50% destes valores serem maiores (ou menores) que os apresentados.

Buscando mais respaldo nos resultados apresentados, fez-se uma análise estatística dos mesmos para um intervalo de confiança de 95%, em outras palavras, há uma probabilidade de somente 5% de os valores apresentados não condizerem com a realidade.

Para isto, o intervalo de confiança de um parâmetro de regressão

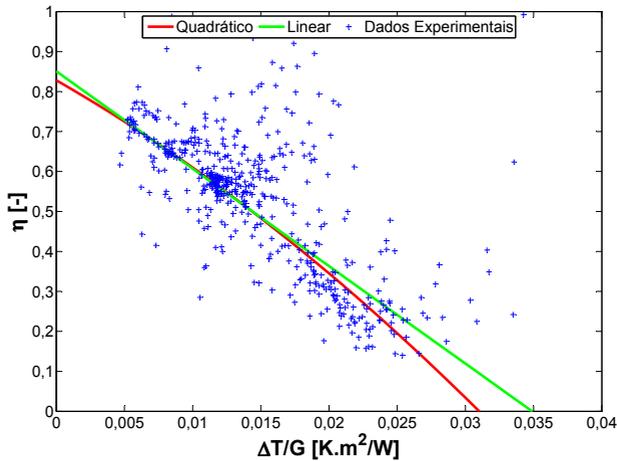


Figura 5.4: Curvas de desempenho térmico para os modelos linear e quadráticos obtidas experimentalmente.

é dado por (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

$$IC_{a_j, 1-\alpha} = a_j \pm t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \quad (5.12)$$

onde $IC_{a_j, 1-\alpha}$ é o intervalo de confiança do parâmetro a_j com uma probabilidade de $1 - \alpha$, $t_{\alpha/2, n-p}$ é o coeficiente de Student para uma probabilidade de $\alpha/2$ dado os graus de liberdade $n - p$ – onde n é o número de pontos utilizados na regressão e p é o número de parâmetros da regressão – e $\hat{\sigma}^2$ é a variância do erro, computada pela equação:

$$\hat{\sigma} = \frac{SSE}{n-p} = \frac{\mathbf{y}'\mathbf{y} - \mathbf{a}'\mathbf{X}'\mathbf{y}}{n-p} \quad (5.13)$$

e C_{jj} é o elemento jj da matriz \mathbf{C} , calculada pela expressão:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \quad (5.14)$$

Analogamente, para a resposta média – neste caso, a eficiência do

coletor solar – o intervalo de confiança é inferido pela fórmula:

$$IC_{\eta(\mathbf{x}_0), 1-\alpha} = \eta(\mathbf{x}_0) \pm t_{\alpha/2, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 \mathbf{x}_0' (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0} \quad (5.15)$$

onde \mathbf{x}_0 é um vetor que define o ponto a ser analisado, isto é, os dados de entrada para o mesmo.

Dito isto, as tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os valores para os parâmetros com seus intervalos de confiança para os modelos linear e quadrático, respectivamente, assim como as figuras 5.5 e 5.6 mostram as curvas de desempenho normalizadas com seus intervalos de confiança.

Tabela 5.4: Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente para o modelo linear com intervalo de confiança de 95%.

Parâmetro	Unidade	Valor		
		Mínimo	Médio	Máximo
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{0^\circ-15^\circ}$	-	0,778	0,830	0,881
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{15^\circ-30^\circ}$	-	0,784	0,834	0,885
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{30^\circ-45^\circ}$	-	0,779	0,839	0,899
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{45^\circ-60^\circ}$	-	0,775	0,842	0,910
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{60^\circ-75^\circ}$	-	0,780	0,891	1,002
$F_R(\tau\alpha) K_d$	-	0,871	0,970	1,068
$F_R U_L$	$W/m^2.K$	21,57	24,37	27,18
$(mC)_e$	$J/m^2.K$	31.279,2	37.033,7	42.788,2

5.7 Comparação com o modelo numérico

Diferentemente do ambiente experimental, no ambiente computacional é extremamente fácil manter constantes as condições de ensaio de um coletor solar. Sendo assim, não há motivo aparente para a adoção do regime quase-dinâmico num ambiente computacional, além de que, caso este fosse adotado, a simulação numérica tornar-se-ia mais complexa, já que envolveria a resolução de termos transientes. Em suma, a curva de desempenho numérica é obtida simulando um ensaio em regime permanente.

Posto isso, os dados apresentados no Apêndice D foram os utilizados para simular as várias condições de operação de um coletor solar. Uma vez obtidos todos os pontos, faz-se uma regressão nestes

Tabela 5.5: Parâmetros de desempenho térmico obtidos experimentalmente para o modelo quadrático com intervalo de confiança de 95%.

Parâmetro	Unidade	Valor		
		Mínimo	Médio	Máximo
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{0^\circ-15^\circ}$	-	0,755	0,814	0,874
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{15^\circ-30^\circ}$	-	0,758	0,818	0,879
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{30^\circ-45^\circ}$	-	0,733	0,813	0,892
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{45^\circ-60^\circ}$	-	0,705	0,806	0,907
$F_R(\tau\alpha) K_b(\theta)_{60^\circ-75^\circ}$	-	0,680	0,840	1,001
$F_R(\tau\alpha) K_d$	-	0,725	0,907	1,089
$F_R U_L$	$W/m^2.K$	7,69	19,52	31,34
$F_R U_{L,T}$	$W/m^2.K^2$	-0,344	0,232	0,807
$(mC)_e$	$J/m^2.K$	31.279,2	36.388,7	42.788,2

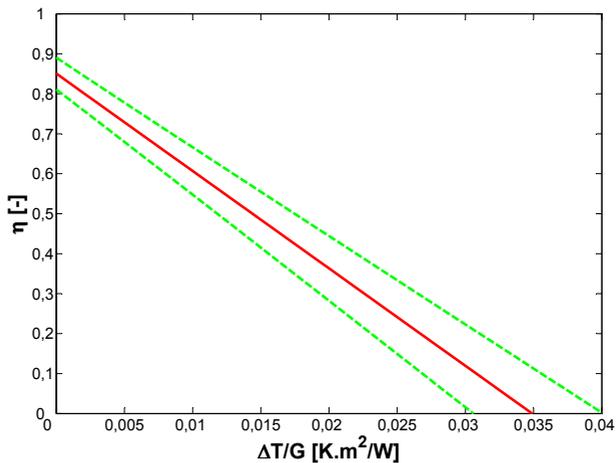


Figura 5.5: Curva de desempenho térmico obtida experimentalmente para o modelo linear (em vermelho) com intervalo de confiança de 95% (em verde).

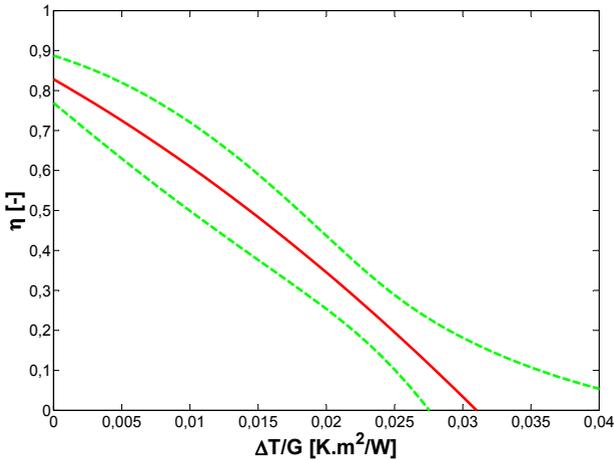


Figura 5.6: Curva de desempenho térmico obtida experimentalmente para o modelo quadrático (em vermelho) com intervalo de confiança de 95% (em verde).

para a obtenção dos parâmetros do coletor. Destaca-se que, para este caso, usou-se o método de regressão dos mínimos quadrados (não-ponderados), uma vez que, em princípio, a incerteza de cada ponto é a mesma.

Por se tratar de um ensaio em regime permanente, a equação de caracterização de desempenho não contém o termo transiente. Sendo assim, a equação para o modelo linear é a que segue:

$$\eta = F_R (\tau\alpha) K_b \frac{G_b}{G} + F_R (\tau\alpha) K_d \frac{G_d}{G} - F_R U_L \frac{(T_m - T_{amb})}{G} \quad (5.16)$$

e para o modelo quadrático é a expressão seguinte:

$$\eta = F_R (\tau\alpha) K_b \frac{G_b}{G} + F_R (\tau\alpha) K_d \frac{G_d}{G} - F_R U_L \frac{(T_m - T_{amb})}{G} - F_R U_{L,T} \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G} \quad (5.17)$$

O resumo dos parâmetros obtidos numericamente pode ser visto na tabela 5.6 e, de forma gráfica, as curvas de desempenho normaliza-

das são mostradas na figura 5.7, juntamente com os dados de entrada.

Tabela 5.6: Parâmetros de desempenho térmico obtidos numericamente.

Parâmetro	Unidade	Modelo	
		Linear	Quadrático
$F_R(\tau\alpha)K_b$	-	0,871	0,868
$F_R(\tau\alpha)K_d$	-	0,394	0,357
$F_R U_L$	$W/m^2.K$	21,31	19,81
$F_R U_{L,T}$	$W/m^2.K^2$	-	0,042

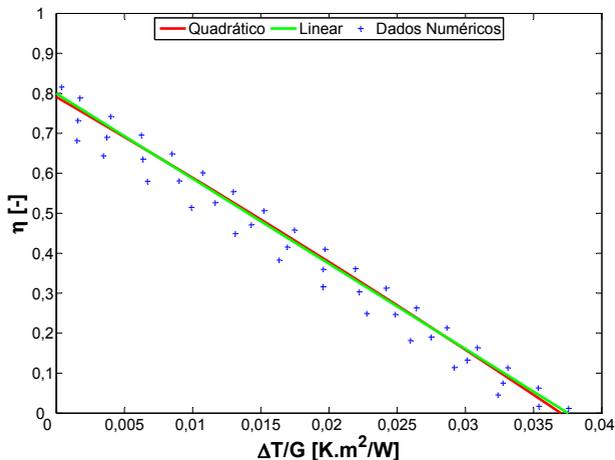


Figura 5.7: Curvas de desempenho térmico obtidas numericamente para os modelos linear e quadrático.

Para facilitar a comparação dos resultados das curvas de desempenho obtidas numérica e experimentalmente, é possível ver, nas figuras 5.8 e 5.9, as curvas de desempenho obtidas numericamente para os modelos linear e quadrático, juntamente com os respectivos limites para um intervalo de confiança de 95 % da curva obtida experimentalmente.

Salvo o início da curva de desempenho do modelo linear, as curvas de desempenho obtidas numericamente permanecem na região contemplada pelos limites do intervalo de confiança de 95 % dos resultados experimentais em toda a faixa de condições de operação. É interessante notar que, para ambos os modelos, o parâmetro de ga-

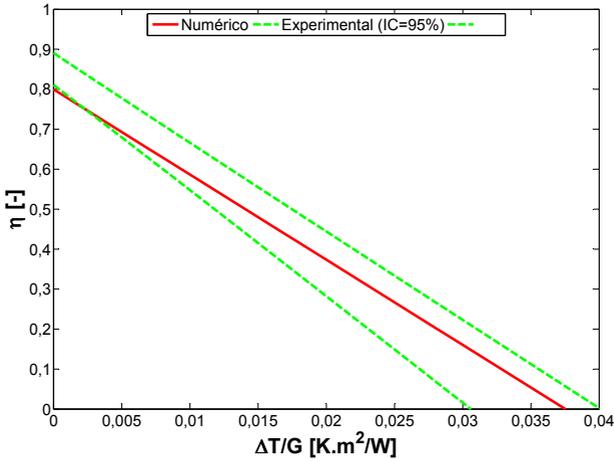


Figura 5.8: Curva de desempenho térmico obtida numericamente (em vermelho), juntamente com os limites do intervalo de confiança de 95% da obtida experimentalmente (em verde), para o modelo linear.

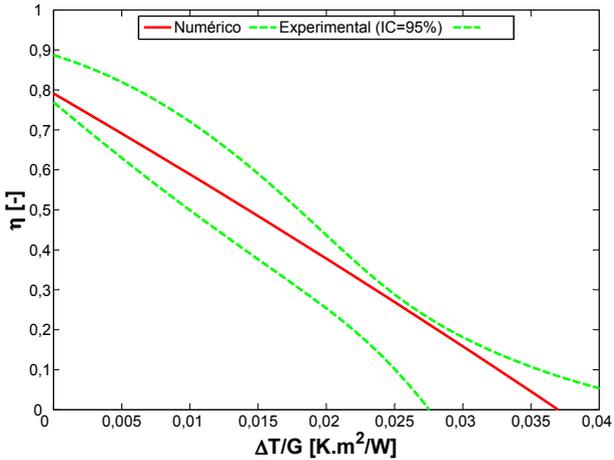


Figura 5.9: Curva de desempenho térmico obtida numericamente (em vermelho), juntamente com os limites do intervalo de confiança de 95% da obtida experimentalmente (em verde), para o modelo quadrático.

nho de calor esteve muito próximo do limite inferior do intervalo de confiança, evidenciando o conservadorismo na adoção do modelo de transmissividade da água, assim como na correlação do coeficiente de transferência de calor por convecção do vento. Contudo, conforme as temperaturas de operação crescem ($\Delta T/G$ maior), as curvas de desempenho aproximam-se do limite superior do intervalo de confiança, o que significa dizer que o(s) parâmetro(s) de perda de calor estão sendo subestimados. Isto pode se dar por alguns motivos: (i) a transferência de calor por convecção na superfície inferior não acontece exclusivamente por convecção natural, (ii) o uso da temperatura ambiente para caracterizar a transferência de calor por radiação na superfície inferior pode não ser adequado, (iii) as perdas por radiação no polímero semitransparente não são suficientemente bem representadas e (iv) o conservadorismo na escolha da correlação do coeficiente de transferência de calor por convecção com a água.

Apesar das limitações supracitadas, os resultados obtidos numericamente são entendidos como bastante satisfatórios. Dito isto, o modelo numérico construído neste trabalho é endossado e, deste ponto em diante, considera-se este como validado experimentalmente para as análises posteriores.

6 Análises de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é a forma mais usual de obter conhecimento sobre quais as principais variáveis que afetam um resultado.

O processo de concepção ou aprimoramento de qualquer produto ou serviço deve, idealmente, conter uma etapa em que, deixando as percepções intuitivas de lado, analisa-se de forma impessoal os grandes contribuidores para o sucesso de tal.

Há algumas maneiras de fazer isto, no entanto, uma das mais habituais é conduzindo uma análise de sensibilidade. Este tipo de análise visa identificar – normalmente, isoladamente – o efeito da variação de algum parâmetro no resultado global; por exemplo: a identificação da importância da temperatura em processos químicos, ou mesmo o efeito da taxa de fluxo mássico em um processo de transferência de calor. Quando há a necessidade de se explorar o efeito combinado de duas ou mais variáveis, deve-se buscar métodos mais sofisticados, tais como os estatísticos.

Neste capítulo, serão apresentados estudos visando identificar os parâmetros construtivos críticos no desempenho do coletor solar duopolimérico. Identificados estes, sugere-se uma otimização da configuração de tal equipamento, e, assim, tem-se uma ideia do seu potencial.

6.1 Considerações preliminares

Antes da análise de sensibilidade dos parâmetros construtivos do coletor solar duopolimérico, deve-se ter conhecimento do objeto de estudo. Neste caso, este é o modelo de coletor solar apresentado até o momento, cujas características podem ser vistas no apêndice D, as quais são as mesmas utilizadas nos capítulos 4 e 5. As informações de geometria e de propriedades dos materiais, até o momento, foram constantes na caracterização do desempenho térmico de um coletor solar, ao passo que as condições de operação, evidentemente, foram variadas para simular o comportamento do equipamento sob diferen-

tes situações. Percebe-se que estas condições de operação são divididas em três grandes grupos: irradiância global igual a 1000 W/m^2 , 850 W/m^2 e 700 W/m^2 , em que, respectivamente, têm-se uma fração de radiação difusa com valores de 10 %, 20 % e 30 %. Em cada um destes grupos, fixa-se uma temperatura do ambiente e varia-se a temperatura de entrada da água, fazendo com que as simulações em cada grupo de irradiância global possam varrer a faixa de operações do coletor solar.

Deste modo, primeiramente, para entender-se os mecanismos preponderantes de perda de calor, dividiram-se as perdas de calor tanto por modo de transferência como por superfície e material onde o fenômeno ocorre. Sendo assim, foram identificadas 6 divisões, quais sejam: convecção na superfície superior ($\dot{q}_{conv,sup}$), convecção na superfície inferior ($\dot{q}_{conv,inf}$), radiação na superfície inferior ($\dot{q}_{rad,inf}$), radiação no topo das nervuras ($\dot{q}_{rad,nerv}$), radiação no polímero semitransparente ($\dot{q}_{rad,p.st}$) e radiação na água ($\dot{q}_{rad,agua}$); as mesmas já utilizadas na análise de erros de origem numérica, no capítulo 4 e, para um melhor entendimento, ilustradas na figura 6.1. Naturalmente, a relevância destes modos de transferência de calor varia conforme os parâmetros construtivos do coletor, assim como com as condições de operação as quais este está sujeito. A tabela 6.1 sintetiza os dados obtidos com as simulações supracitadas, mostrando a participação mínima e máxima de cada modo de transferência de calor, perante a perda de calor total do coletor solar, nas diferentes condições de operação.

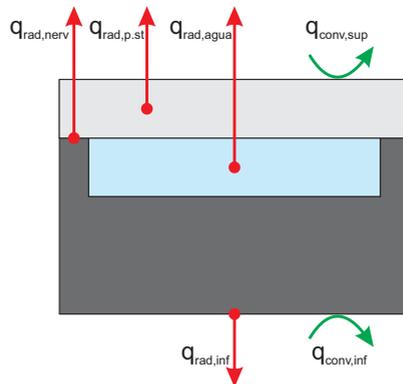


Figura 6.1: Ilustração dos modos de transferência de calor do coletor solar duopolimérico.

Pode-se notar que, independente da irradiância global e da fração

Tabela 6.1: Participação mínima e máxima dos modos de transferência na perda de calor total do coletor solar em diferentes condições de operação.

Parâmetro	$G = 1000\text{W/m}^2$		$G = 850\text{W/m}^2$		$G = 700\text{W/m}^2$	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx
$\dot{q}_{conv,sup}$	12,6%	46,0%	13,1%	44,9%	11,0%	45,5%
$\dot{q}_{conv,inf}$	1,5%	8,2%	1,8%	8,2%	1,9%	8,4%
$\dot{q}_{rad,inf}$	22,5%	37,1%	22,8%	36,9%	22,7%	38,8%
$\dot{q}_{rad,nerv}$	2,4%	7,2%	2,4%	6,6%	2,4%	8,0%
$\dot{q}_{rad,agua}$	0,4%	2,3%	0,1%	2,7%	0,0%	3,1%
$\dot{q}_{rad,p.st}$	19%	42%	19%	42%	18%	40,0%

de radiação difusa, os modos de transferência de calor ocupam uma faixa bem definida de participação; por exemplo, a perda por radiação no topo das nervuras, $\dot{q}_{rad,nerv}$, tem uma participação entre 2% e 8%, independente das condições de operação. O intuito da tabela em questão é explicitar que, analisada qualquer uma das três condições de irradiância global, pode-se subentender que as outras duas também foram. Este pressuposto será aplicado no restante deste capítulo. Portanto, doravante somente serão mostradas informações para o caso de irradiância global igual a 1000W/m^2 .

Outra contribuição da tabela é a de restringir o foco das análises nos modos de transferência de calor preponderantes. É facilmente perceptível que estes são: convecção na superfície superior, radiação na superfície inferior e radiação no polímero semitransparente. Para melhor entender como estes modos se comportam dada a condição de operação, observa-se na figura 6.2 a evolução das participações de cada um destes na perda de calor total do coletor solar. Esta figura é bastante elucidativa, podendo-se perceber que em condições de operação de baixo $\Delta T/G$, as perdas preponderantes são as perdas radiativas pelo polímero semitransparente e pela superfície inferior, e, conforme $\Delta T/G$ aumenta, a perda por convecção na superfície superior supera esses dois modos de transferência de calor. Este comportamento recebe contribuição do modelo de difusão radiativa, tendo em vista que a troca de calor radiativa intrasólido (polímero semitransparente) é tratada similarmente à condução. Neste sentido, o calor sendo retirado por convecção na superfície superior pode ser trazido tanto por condução como por difusão radiativa, sendo que a parcela advinda por difusão radiativa cresce com o cubo da temperatura (vide 3.64). Infelizmente, esta é uma limitação da análise e para a diferenciação destes efeitos, seria necessário alguma implementação no algoritmo compu-

tacional. De qualquer forma, estimando o valor da condutividade de Rosseland para uma temperatura de $75\text{ }^\circ\text{C}$ – um pouco mais alta que a atingida nas simulações – chega-se ao valor de cerca de $0,011\text{ W}/(\text{m K})$, ao passo que a condutividade térmica do polímero semitransparente é de $0,21\text{ W}/(\text{m K})$; isto é, representa somente em torno de 5% da condutividade térmica global, mesmo na situação mais favorável.

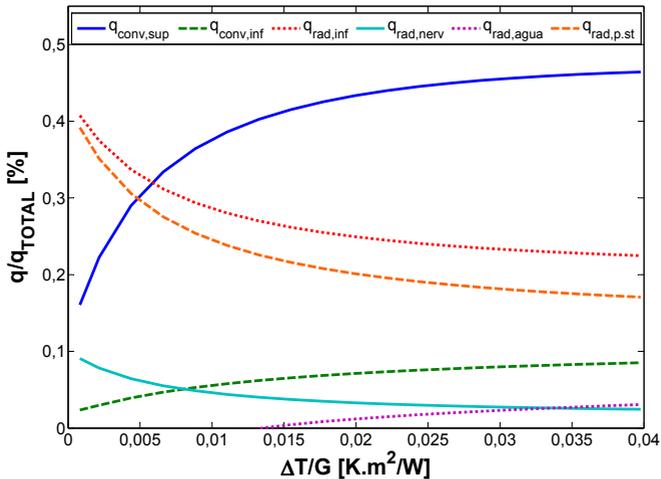


Figura 6.2: Participação dos modos de transferência de calor na perda de calor total do coletor solar.

É importante ressaltar que, apesar da participação de alguns modos de transferência de calor diminuir com o aumento de $\Delta T/G$, o valor absoluto de nenhum destes é reduzido. O que acontece é o crescimento mais pronunciado de alguns modos de transferência de calor frente aos outros.

Adicionalmente, é interessante perceber que os três modos principais de transferência de calor, quais sejam: convecção na superfície superior, radiação na superfície inferior e radiação no polímero semitransparente; somam entre 85% e 90% da perda de calor total. Naturalmente, por ocorrer em uma área bastante pequena, a perda de calor por radiação pelo topo das nervuras, torna-se insignificante; no entanto, vê-se que as perdas por convecção na superfície inferior e por radiação na água, num primeiro momento, podem ser relegadas a segundo plano.

Por fim, a primeira vista, é difícil deduzir um parâmetro construtivo que, prontamente, caso alterado, reduza o efeito dos três modos preponderantes simultaneamente. Com este objetivo, conduz-se a análise de sensibilidade.

6.2 Dimensões do canal

Os primeiros parâmetros construtivos a serem investigados são as dimensões do canal, quais sejam, a altura e a largura do mesmo.

Iniciando pela altura do canal, cujo valor referência é 5 mm, escolheu-se variar esta de 1 mm até 10 mm. Desta forma, selecionou-se alguns valores de altura intermediários aos limites estabelecidos e, para cada um destes valores, simulou-se o ensaio de desempenho. As curvas de desempenho destes casos podem ser vistas na figura 6.3.

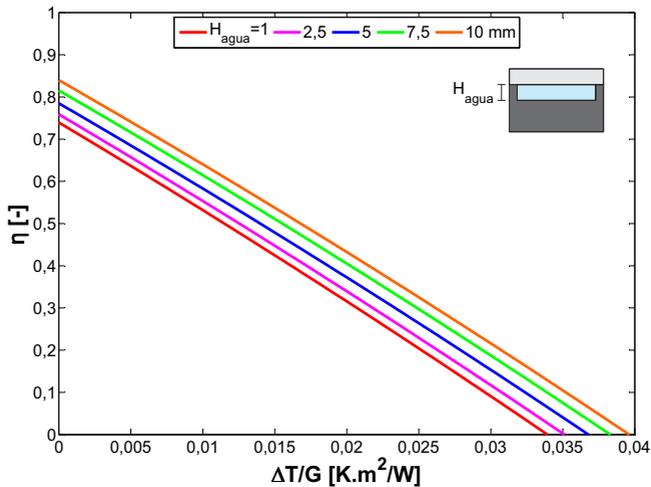


Figura 6.3: Efeito da altura do canal nas curvas de desempenho.

O aumento da dimensão da altura do canal tem um impacto positivo nas curvas de desempenho do coletor solar. O principal motivo é o aumento da absorção de radiação solar pela própria água, o que afeta diretamente o termo da eficiência. Além disto, de forma mais discreta, o coletor solar tem um acréscimo de área que, mesmo não sendo na disposição mais adequada, absorve calor adicional.

Os valores dos parâmetros de desempenho para todos os casos podem ser vistos na tabela 6.2, os quais confirmam o crescimento dos parâmetros de ganho de calor com o aumento da altura do canal. Os parâmetros $F_R(\tau\alpha)K_b$ e $F_R(\tau\alpha)K_d$ são 7,3% e 2,1% maiores, respectivamente, comparando-se a altura de 10 mm com o caso de referência. Ao contrário dos parâmetros de ganho de calor, os parâmetros de perda de calor são fracamente afetados, resumindo-se a uma diferença de menos de 5%, mesmo comparando-se os casos extremos.

Tabela 6.2: Efeito da altura do canal nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Altura do Canal [mm]				
	1	2,5	5	7,5	10
$F_R(\tau\alpha)K_b$	0,809	0,830	0,860	0,895	0,923
$F_R(\tau\alpha)K_d$	0,347	0,353	0,358	0,362	0,365
$F_R U_L$	20,33	20,11	19,77	19,66	19,52
$F_R U_{L,T}$	0,043	0,043	0,043	0,042	0,042

Deve-se ter ciência que um aumento indefinido da altura do canal, dentro do modelo matemático estabelecido, coloca em cheque algumas das hipóteses consideradas. Uma é a de escoamento plenamente desenvolvido, já que com o aumento da altura do canal, há uma redução da velocidade média da água fluindo por este, e, por sua vez, pode tornar a região de entrada relevante. Ainda, a hipótese de tratar a água como um único volume finito poderia se tornar inconsistente com grandes valores de altura do canal, observado que os gradientes de temperatura na própria camada de água e entre os polímeros semitransparente e opaco em contato com esta poderiam causar instabilidades no escoamento. Cita-se isto para expor as limitações do modelo matemático construído, assim como para explanar a opção de restringir a faixa de variação da altura do canal.

A outra dimensão a ser analisada é a largura do canal. Esta foi analisada numa faixa de valores entre 5 e 100 mm, sendo que o valor para o caso de referência é de 25 mm. As curvas de desempenho para alguns casos situados na faixa citada podem ser vistas na figura 6.4 e os parâmetros de desempenho destes são apresentados na tabela 6.3.

Percebe-se que para pequenos valores de largura do canal – neste caso, 5 mm – a curva de desempenho é aprimorada, todavia, devido ao acréscimo no ganho de calor e não por redução das perdas. Estes efeitos podem ser notados observando o ponto onde as curvas de desempenho interceptam o eixo das ordenadas e percebendo que as curvas são, praticamente, paralelas.

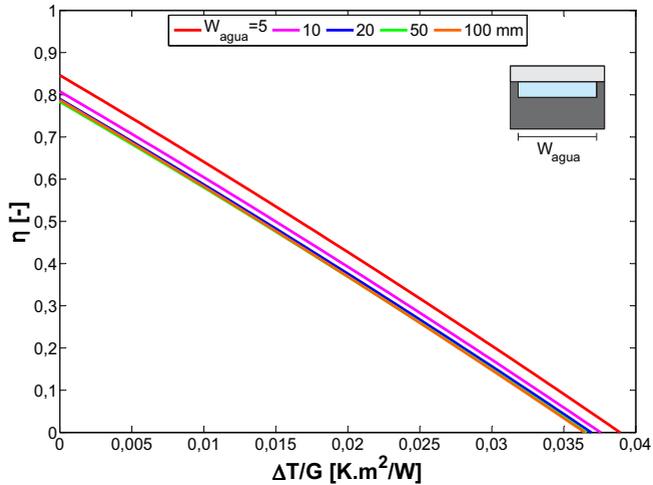


Figura 6.4: Efeito da largura do canal nas curvas de desempenho.

Tabela 6.3: Efeito da largura do canal nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Largura do Canal [mm]				
	5	10	20	50	100
$F_R (\tau\alpha) K_b$	0,967	0,909	0,871	0,846	0,843
$F_R (\tau\alpha) K_d$	0,164	0,237	0,330	0,429	0,475
$F_R U_L$	20,09	19,91	19,83	19,86	20,05

O fenômeno mais importante com a redução da largura do canal é o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção da água. Isto significa que o calor absorvido pelas superfícies do polímero opaco tem mais facilidade de ser transferido para a água, o que culmina com o aumento da eficiência de absorção de calor pelo coletor solar. Adicionalmente, desta maneira, mesmo com a baixa condutividade térmica do polímero opaco, as nervuras dos canais passam a funcionar como aletas, potencializando o ganho de calor da água.

No caso das perdas, a variação é pequena, como pode ser visto pelos valores da tabela 6.3. Todavia, algumas observações são pertinentes. Quando a largura do canal é pequena, a superfície do topo das nervuras passa a ser significativa perante a área total, o que intensifica o valor destas perdas, conforme mostra a figura 6.5. De outro modo, a redução da superfície de água garante uma diminuição considerável das perdas por radiação deste meio.

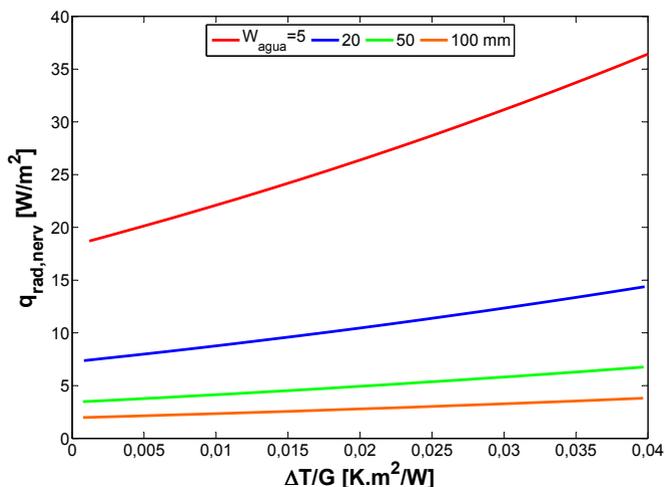


Figura 6.5: Perda de calor por radiação do topo das nervuras em função da largura do canal.

Com o aumento da largura do canal, a perda pelo topo das nervuras perde a sua relevância, ao mesmo tempo que a perda por radiação da água ganha corpo. Como a água passa a ter uma maior superfície para emanar radiação térmica, o polímero semitransparente também acaba por emitir mais energia para o ambiente, fazendo com que as

perdas por este modo tenham um pequeno acréscimo. De outro modo, com a redução do coeficiente de convecção da água, a perda de calor por convecção na superfície superior tem um leve decréscimo. As outras perdas, convecção e radiação na superfície inferior, são praticamente constantes.

Os cuidados com relação a hipótese de escoamento plenamente desenvolvido, evidenciados quando analisada a variação a altura do canal, são menos relevantes quando se varia a largura do mesmo. Uma vez que o fluxo de água é uma função da área do coletor, ao aumentar a largura do canal, aumenta-se o fluxo de água proporcionalmente. Conforme mencionado anteriormente, as implicações de gradientes térmicos são relevantes para a altura do canal, mas não o são para a largura; inclusive, caso a largura seja aumentada indefinidamente, o escoamento pode passar a ser tratado como unidimensional, análogo ao escoamento entre duas placas paralelas.

6.3 Condutividade térmica do polímero semitransparente

No caso de referência, o valor utilizado para a condutividade térmica do polímero semitransparente é, naturalmente, o do policarbonato (PC), igual a $0,21 \text{ W}/(\text{m K})$. Coincidentemente, este é um valor intermediário aos limites superior e inferior de condutividade térmica para polímeros, que vão desde $0,05$ até $0,50 \text{ W}/(\text{m K})$. Naturalmente, a seleção de um polímero com uma menor condutividade térmica beneficiará o desempenho do coletor solar, uma vez que a matéria de interesse – no caso, a água – fica menos sujeita às perdas combinadas de condução e convecção.

Visando detalhar estas impressões, propuseram-se alguns valores de condutividade térmica – entre $0,01$ e $1 \text{ W}/(\text{m K})$ – e estes foram simulados conforme o procedimento padrão; ressalta-se que a espessura da camada foi mantida constante para não afetar as espessuras ópticas solar e térmica, que são assunto de seções posteriores. Para expressar os dados de forma mais genérica, optou-se por traduzir os valores de condutividade térmica em condutância térmica, aglutinando os fatores termofísicos e geométricos e tornando a análise mais palpável, como será percebido na próxima seção. Por exemplo, para o caso de referência, a espessura do polímero semitransparente é igual a 5 mm e a condutividade térmica, igual a $0,21 \text{ W}/(\text{m K})$, portanto a condutância térmica, obtida pela razão entre a condutividade térmica e a espessura da camada, resulta em um valor de $42 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Deste modo, para os valores propostos – $0,01$ a $1 \text{ W}/(\text{m K})$ – tem-se uma condutância térmica

desde 2 até 200 W/(m² K). As curvas de desempenho para estes casos podem ser vistas na figura 6.6 e os valores dos parâmetros das mesmas são listados tabela 6.4.

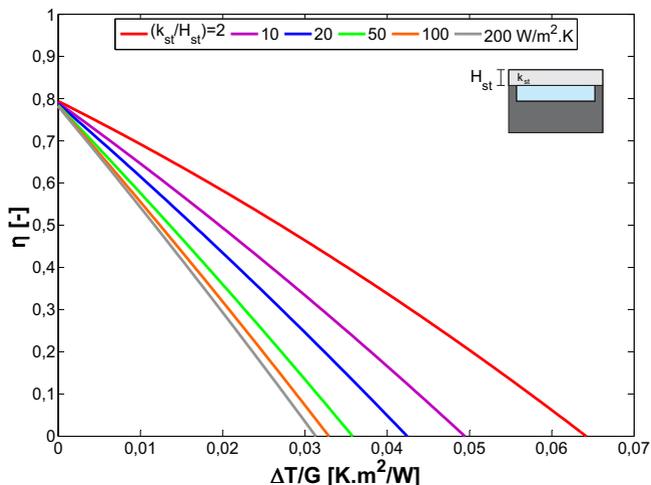


Figura 6.6: Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente nas curvas de desempenho.

Tabela 6.4: Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Condutância Térmica Pol. Semitransparente [W/(m ² K)]					
	2	10	20	50	100	200
$F_R (\tau\alpha) K_b$	0,869	0,866	0,863	0,860	0,858	0,856
$F_R (\tau\alpha) K_d$	0,367	0,362	0,360	0,358	0,358	0,357
$F_R U_L$	9,80	14,03	16,84	20,37	22,28	23,47
$F_R U_{L,T}$	0,040	0,040	0,041	0,043	0,046	0,048

Como esperado, a redução da condutância térmica afeta positivamente a curva de desempenho em toda a sua extensão: no início a diferença é pouco pronunciada, mas esta aumenta conforme as temperaturas de operação ($\Delta T/G$) crescem. Observando-se os parâmetros, fica claro que a condutância térmica do polímero semitransparente

pouco afeta os parâmetros de ganho de calor, mas reduz drasticamente os parâmetros de perda.

Para ilustrar a dimensão desta redução de perda, a figura 6.7 traça o comportamento da perda por convecção da superfície superior, dados os parâmetros de operação, para três casos de condutância térmica do polímero semitransparente. É evidente a acentuada redução deste modo de perda de calor; vê-se, por exemplo, que a perda é reduzida pela metade, comparando-se as curvas de 20 e 200 W/(m² K).

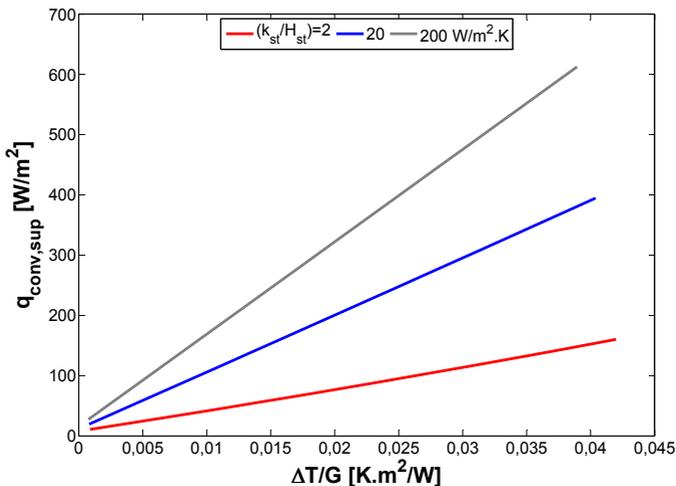


Figura 6.7: Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente na perda por convecção na superfície superior.

Outro comportamento digno de nota é o da perda de calor por radiação do polímero semitransparente. Haja vista que a condutância térmica deste foi reduzida, entende-se que os gradientes de temperatura no polímero semitransparente serão mais severos. Este efeito faz com que as camadas mais próximas do ambiente fiquem menos quentes, ao passo que as próximas da água fiquem mais quentes. Como o polímero semitransparente é opaco para a radiação térmica, as camadas mais quentes não conseguem irradiar calor para o ambiente externo, mas somente para as suas proximidades. Sendo assim, as camadas passíveis de transferir calor para o ambiente são, justamente, as mais frias, reduzindo este potencial. A figura 6.8 mostra este comportamento.

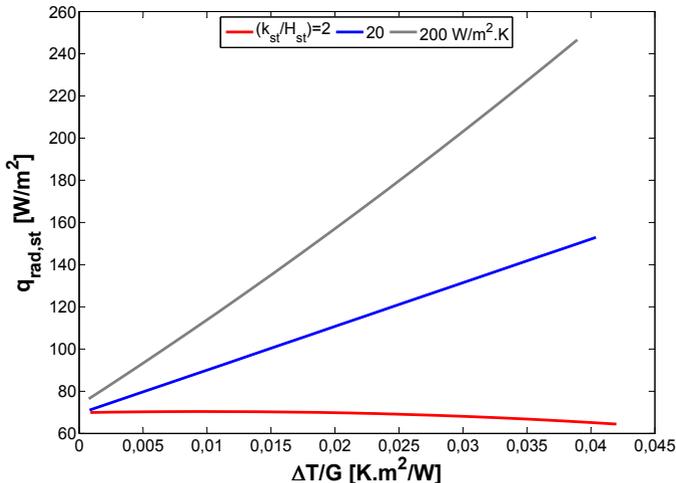


Figura 6.8: Efeito da condutância térmica do polímero semitransparente na perda por radiação do polímero semitransparente.

Da mesma forma que a perda por radiação do polímero semitransparente, as perdas por radiação da água e do topo das nervuras sofrem um decréscimo em seus valores com a redução da condutância térmica do polímero semitransparente. No entanto, estas foram menos significantes perante a perda total.

Enfim, ao reduzir a condutância térmica do polímero semitransparente, a única saída para o calor é a superfície inferior, onde este é transferido por radiação ou convecção.

6.4 Condutividade térmica do polímero opaco

Em linha com a análise da condutividade térmica para o polímero semitransparente, a análise para o polímero opaco também será feita em relação a condutância térmica. O caso de referência utiliza o valor de condutividade térmica do polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW-PE), igual a 0,47 W/(m K), e a espessura de sua camada que é de 20 mm; desta maneira, a condutância térmica é de 23,5 W/(m² K).

Colocado deste modo, em termos da condutância térmica, é possível comparar a capacidade de isolamento de ambos os polímeros. Vê-se, então, que o potencial de perda de calor pelo polímero semitransparente é quase duas vezes maior que pelo polímero opaco (con-

dutoância térmica de 42 *versus* 23,5 W/(m² K)). Outro ponto interessante da condutância térmica é calcular a espessura necessária para um dado polímero atingir um valor de condutância térmica. Caso houvesse a intenção de igualar a condutância térmica do polímero semitransparente a do polímero opaco, prontamente infere-se que a espessura daquele teria de ser de 8,9 mm.

Prosseguindo, a fim de explorar os efeitos da condutividade térmica do polímero opaco no desempenho térmico do coletor solar dupolimérico, abrangeu-se uma faixa de valores entre 0,01 e 1 W/(m K), sempre mantendo a espessura da camada constante, assim como o feito para o polímero semitransparente. As curvas de desempenho para estes casos podem ser vistas na figura 6.9 e os parâmetros na tabela 6.5.

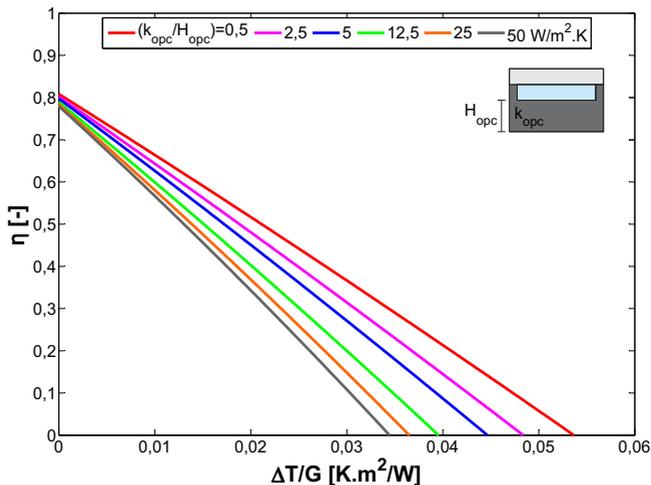


Figura 6.9: Efeito da condutância térmica do polímero opaco na curva de desempenho.

Vê-se que há potencial significativo de ganho de desempenho com a variação da condutância térmica do polímero opaco, podendo fazer com que a faixa de operação do coletor solar seja expandida em mais de 50%. A tabela 6.5 revela que os ambos os parâmetros de perda de calor são responsáveis por esse crescimento da curva de desempenho; o parâmetro linear de perda de calor tem uma redução de perda de 30% e o quadrático de cerca de 70%, quando comparados os casos de

Tabela 6.5: Efeito da condutância térmica do polímero opaco nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Condutância Térmica Pol. Opaco [W/(m ² K)]					
	0,5	2,5	5	12,5	25	50
$F_R (\tau\alpha) K_b$	0,885	0,880	0,875	0,866	0,859	0,854
$F_R (\tau\alpha) K_d$	0,376	0,364	0,358	0,355	0,357	0,361
$F_R U_L$	14,29	15,73	16,89	18,69	19,88	20,72
$F_R U_{L,T}$	0,014	0,018	0,022	0,032	0,044	0,055

referência e o de menor condutância térmica.

As perdas são fortemente reduzidas, evidentemente, pela redução dos modos de transferência de calor dependentes da condutividade térmica do polímero opaco, quais sejam: convecção e radiação na superfície inferior, ambos sofrendo decréscimos relevantes. A figura 6.10 indica a redução das perdas por convecção na superfície inferior para três casos. Igualmente, as perdas por radiação na superfície inferior, para os mesmos três casos, são expostas na figura 6.11. Pode-se perceber que qualquer redução na condutância do polímero pode acarretar reduções interessantes de perda de calor e que, como já mostrado, refletem no desempenho do coletor solar.

Em se tratando dos parâmetros de ganho de calor, é possível notar um leve aumento nos mesmos. Este efeito é resultado da maior facilidade do calor ser absorvido pela água, uma vez que a resistência térmica para transferir-se para o ambiente foi aumentada. Deste modo, o parâmetros de ganho de calor para a radiação direta e para a radiação difusa apresentam crescimento.

6.5 Espessura óptica solar do polímero semitransparente

A espessura óptica de algum meio é dada pela multiplicação da dimensão deste meio pelo seu coeficiente de atenuação. A dimensão a ser escolhida é a que melhor define as direções às quais a radiação se propaga. Para o caso de referência, esta dimensão é a espessura da camada de polímero semitransparente, e o coeficiente de atenuação se resume ao coeficiente de absorção. Sabe-se que o coeficiente de absorção é diferente para radiação solar e radiação térmica devido a sua dependência espectral, sendo assim, há duas espessuras ópticas: uma para a radiação solar e outra para a radiação térmica. Nesta seção o foco é na espessura óptica para radiação solar do polímero semitransparente, ou somente espessura óptica solar.

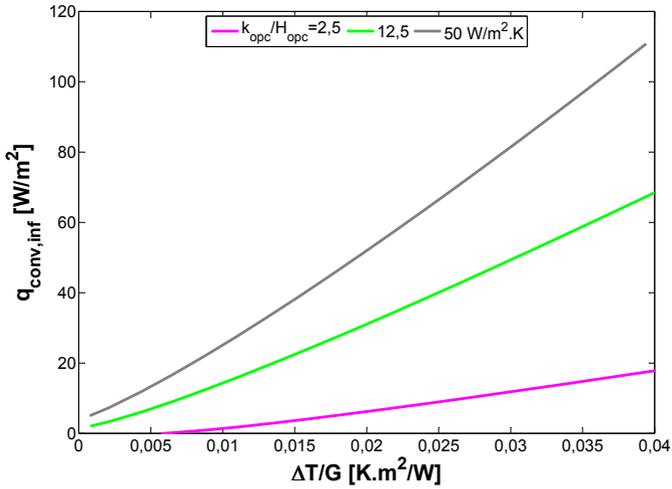


Figura 6.10: Efeito da condutância térmica do polímero opaco na perda por convecção na superfície inferior.

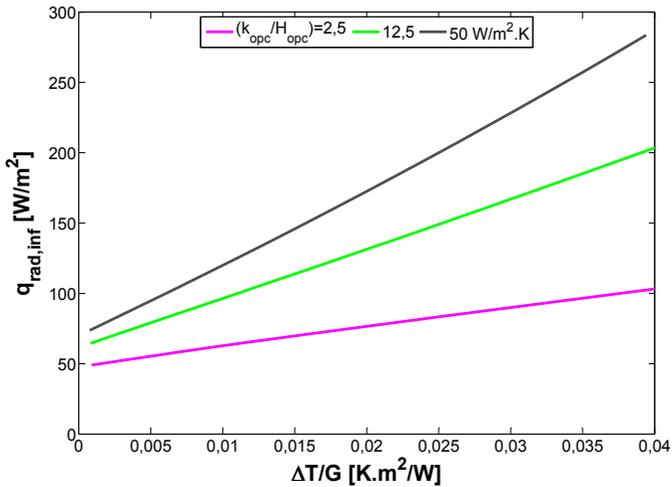


Figura 6.11: Efeito da condutância térmica do polímero opaco na respectiva perda por radiação.

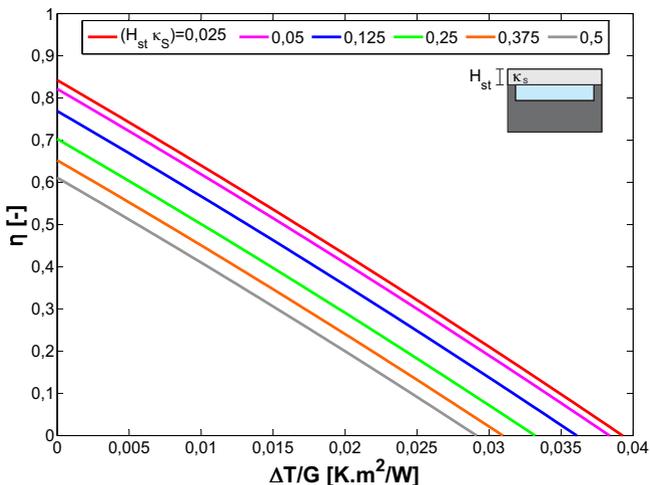


Figura 6.12: Efeito da espessura óptica solar na curva de desempenho.

A espessura óptica solar do polímero semitransparente será responsável por determinar quanta radiação solar será transmitida por este e atingirá a água e o polímero opaco. No caso de referência, use-se o valor de coeficiente de absorção solar para o PC, que é de 20 m^{-1} . Sabendo que a espessura da camada do polímero semitransparente, também para o caso referência, é de 5 mm, temos que a espessura óptica solar deste meio é de 0,1.

A fim de avaliar outros valores de espessura óptica, variou-se o coeficiente de absorção entre 5 até 100 m^{-1} – o que corresponde a 0,025 e 0,5 em termos de espessura óptica – e, assim como para as análises de condutância térmica, manteve-se constante a espessura da camada. Estes resultados são expostos na figura 6.12 e na tabela 6.6.

Tabela 6.6: Efeito da espessura óptica solar nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Espessura Óptica Solar [-]					
	0,025	0,05	0,125	0,25	0,375	0,5
$F_R (\tau\alpha) K_b$	0,920	0,899	0,843	0,771	0,715	0,668
$F_R (\tau\alpha) K_d$	0,400	0,383	0,348	0,316	0,299	0,287
$F_R U_L$	19,80	19,79	19,76	19,73	19,70	19,68
$F_R U_{L,T}$	0,042	0,042	0,043	0,043	0,044	0,045

Naturalmente, quanto menor a espessura óptica solar, mais radiação consegue atingir, diretamente, a água e, também, o polímero opaco. Com isto, ambos os fatores de ganho de calor (para radiação direta e difusa) crescem e propiciam um aprimoramento da curva de desempenho.

Dois pontos devem ser notados. O primeiro é que uma espessura óptica de 0,025 equivale a, aproximadamente, uma placa de vidro de alta qualidade de cerca de 5 ou 6 mm, isto é, uma espessura óptica bastante pequena. Dito isto, vê-se que esta espessura óptica pequena, apesar de importante, não é suficiente para garantir ao coletor solar um excelente desempenho, uma vez que, caso todo o calor absorvido seja perdido, a eficiência é zero. Desta maneira, tendo em vista que o caso de referência é aquele em que as perdas de calor são elevadas, deve-se ter em mente que o ganho de desempenho pela redução da espessura óptica pode estar sendo penalizado pelas condições de perda de calor. Neste sentido, uma análise do efeito da espessura óptica solar para um coletor solar com parâmetros mais brandos de perdas de calor se faz interessante.

O segundo ponto, meramente informativo, trata do típico comportamento de relações exponenciais, como é o caso da absorção de radiação – vide *Lei de Beer*, equação 3.18. As últimas quatro curvas da figura 6.12 sofrem três acréscimos iguais, de $0,125 \text{ m}^{-1}$, em sua espessura óptica. No entanto, o espaçamento destes três intervalos não é igual, sendo reduzido conforme cada passo no sentido de crescimento da espessura óptica.

6.6 Espessura óptica térmica do polímero semitransparente

A análise da espessura óptica térmica do polímero semitransparente é análoga a espessura óptica solar. Todavia, neste caso, o coeficiente de absorção a ser utilizado no produto para inferir a espessura óptica é, obviamente, o relativo à radiação térmica.

Como já citado, no caso de referência utilizou-se uma cobertura de policarbonato com espessura de 5 mm. Para a radiação térmica, o coeficiente de absorção deste material é de 1200 m^{-1} , o que resulta em uma espessura óptica igual a 6. Um meio com uma espessura óptica muito maior que 1 é chamado de meio espesso, o que significa dizer que pouca radiação consegue atravessá-lo sem ser afetada.

Da mesma maneira que para a espessura óptica solar, os valores a serem explorados da espessura óptica térmica serão obtidos por meio da alteração dos valores do coeficiente de absorção deste. Via de regra,

os polímeros são bons absorvedores de radiação térmica e, por este motivo, não é comum encontrar materiais deste tipo com coeficientes de absorção para radiação térmica inferiores a 500, inclusive, estes podendo ser tão altos quanto 10000 m^{-1} . Com isto, definiu-se os limites de coeficientes de absorção como 500 e 10000 m^{-1} e que remetem a espessuras óticas térmicas entre 2,5 e 50. Valores inferiores de coeficiente de absorção não foram utilizados para não prejudicar a hipótese do modelo de difusão de Rosseland. Os resultados dos casos analisados podem ser observados na figura 6.13 e na tabela 6.7.

Tabela 6.7: Efeito da espessura ótica térmica nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Espessura Ótica Térmica [-]					
	2,5	3,75	5	12,5	25	50
$F_R (\tau\alpha) K_b$	0,880	0,868	0,862	0,859	0,860	0,860
$F_R (\tau\alpha) K_d$	0,415	0,380	0,364	0,351	0,350	0,350
$F_R U_L$	20,20	19,97	19,84	19,58	19,50	19,45
$F_R U_{L,T}$	0,048	0,045	0,043	0,040	0,039	0,038

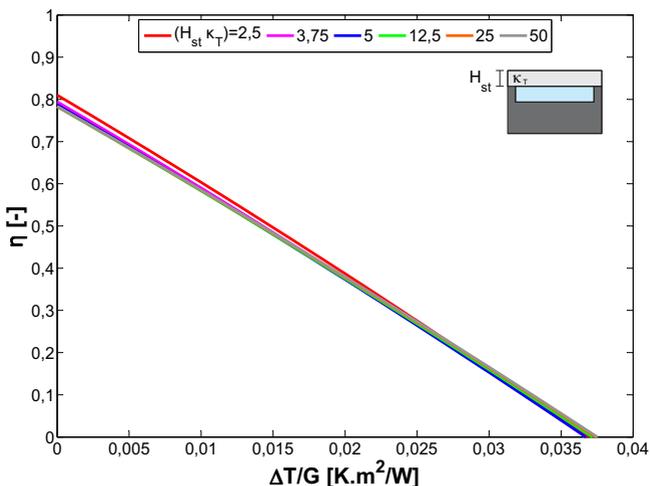


Figura 6.13: Efeito da espessura ótica térmica na curva de desempenho.

Observa-se que todos os casos possuem, praticamente, o mesmo desempenho. Com o aumento da temperatura, entre o caso de espes-

sura óptica térmica de 2,5 e 50, há um leve decréscimo no parâmetro de ganho de calor por radiação direta, algo em torno de 2 %. Para a radiação difusa este número é maior, cerca de 15 %, mas não chega a afetar o desempenho global. No mesmo sentido, os parâmetros de perda de calor sofrem pequenas alterações. O parâmetro linear de perda é reduzido em, aproximadamente, 4 %, ao passo que o parâmetro quadrático é diminuído em pouco mais de 20 %.

Como dito, em linhas gerais, as alterações foram irrelevantes para a faixa analisada. Caso fosse desejado ir além do limite inferior de espessura óptica térmica de 2,5, o modelo matemático teria de ser adequado para tal. Sendo assim, conclui-se que, para o caso do coletor solar duopolimérico, uma espessura óptica de 2,5 já caracteriza o meio como opticamente espesso.

Este, sim, é um resultado interessante: visto que o coeficiente de absorção térmica para o PC é de 1200 m^{-1} e que uma espessura óptica térmica de 2,5 já garante um meio opticamente espesso, percebe-se que uma espessura de camada de PC tão pequena quanto 2 mm é suficiente para barrar as perdas térmicas por radiação. Aliado a isto, sabe-se que existem polímeros com coeficientes de absorção maiores que este, possibilitando a utilização não de placas, mas de filmes, o que possibilitaria, inclusive, coletores solares duopoliméricos flexíveis.

6.7 Espessura do polímero semitransparente

A última análise de sensibilidade a ser realizada refere-se a espessura do polímero semitransparente. Apesar de se tratar de apenas um parâmetro, a modificação deste provoca efeitos divergentes nos parâmetros de desempenho do coletor solar. Isto pode ser percebido pela fórmula da condutância térmica, k_{st}/H_{st} , e das espessuras ópticas solar $H_{st} \kappa_S$, e térmica, $H_{st} \kappa_T$. O aumento da espessura do polímero semitransparente causa uma redução na condutância térmica, assim como um aumento da espessura óptica térmica. Isto significa que os parâmetros de perda de calor são reduzidos, o que beneficiaria o desempenho do coletor solar; todavia, esta mesma variação aumenta a espessura óptica solar, o que se traduz em uma menor absorção de radiação solar pela água e pelo polímero opaco, o que prejudicaria o desempenho. O inverso também é verdadeiro. Em suma, há uma relação de compromisso na espessura do polímero semitransparente e que deve ser analisada cuidadosamente. A figura 6.14 e a tabela 6.8 resumem os valores investigados, que compreendem a faixa de 2,5 mm até 50 mm.

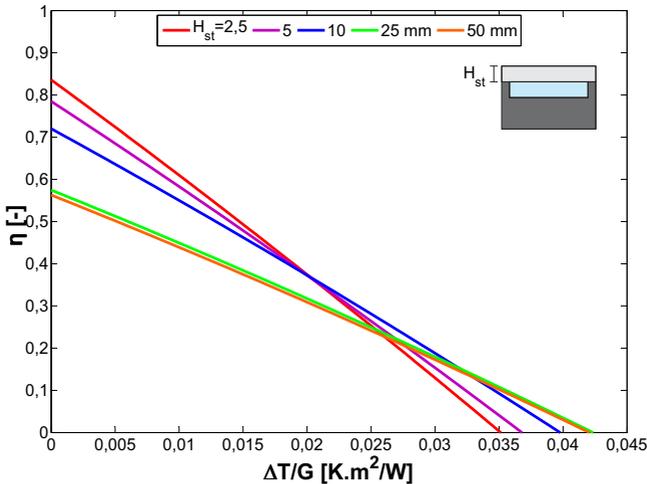


Figura 6.14: Efeito da espessura do polímero semitransparente na curva de desempenho.

Graficamente é possível notar que o aumento da espessura, efetivamente, causa uma redução nos parâmetros de ganho de calor, o que pode ser percebido ao observar o ponto onde as curvas interceptam o eixo y , assim como para os parâmetros de perda de calor, vendo o ponto onde as curvas interceptam o eixo x . A figura 6.14 quantifica o exposto no parágrafo anterior e mostra que esse efeitos contrários atingem um ponto de saturação, a partir do qual os parâmetros de perda de calor não sofrem reduções significativas, ao passo que o ganho de calor é reduzido lentamente.

Tabela 6.8: Efeito da espessura do polímero semitransparente nos parâmetros de desempenho.

Parâmetro	Espessura Pol. Semitransparente [mm]				
	2,5	5	10	25	50
$F_R(\tau\alpha)K_b$	0,909	0,860	0,793	0,636	0,623
$F_R(\tau\alpha)K_d$	0,419	0,358	0,309	0,229	0,225
$F_R U_L$	22,14	19,77	16,62	12,21	12,08
$F_R U_{L,T}$	0,047	0,043	0,037	0,032	0,031

É interessante notar que para o caso de referência, cuja espessura

é 5 mm, um aumento de 10 vezes nesta dimensão será responsável por uma redução de 27,6 % no parâmetro de ganho de calor por radiação direta, ao passo que o parâmetro de perda de calor linear é reduzido em 38,9 %. Isto permite ao coletor solar operar com maior desempenho em altas temperaturas de operação, em detrimento de um menor desempenho em condições de baixa temperatura.

Enfim, não há como estipular se o aumento da espessura do polímero semitransparente é benéfica ou não para o desempenho do coletor solar, já que esta conclusão dependerá da aplicação a que o mesmo será submetido.

6.8 Configuração pré-otimizada

Dadas as considerações levantadas nas últimas seções, estas podem ser unidas para buscar o aprimoramento da curva de desempenho do coletor solar duopolimérico.

Com este intuito, deliberou-se por novos parâmetros construtivos para esta configuração de coletor solar. A cobertura de PC, que possui um coeficiente de absorção solar mediano 20 m^{-1} , supôs-se ser substituída por uma cobertura similar de polimetil-metacrilato (PMMA), mais conhecido como acrílico, e que possui um coeficiente de absorção solar de $8,8 \text{ m}^{-1}$. O coeficiente de absorção térmica de ambos os materiais é igual, desta forma, o valor continuou sendo o de 1200 l/m . Ainda, a condutividade térmica do PC, com um valor de $0,21 \text{ W K/m}$, foi substituída pela do acrílico, todavia, o valor utilizado foi o mesmo, de $0,21 \text{ W/(m K)}$, uma vez que estes materiais também possuem condutividade térmica igual. O polímero opaco também foi substituído, trocando o polietileno de ultra-alto peso molecular por polietileno comum, o que baixa a condutividade térmica do polímero opaco de $0,47 \text{ W K/m}$ para $0,33 \text{ W K/m}$. Por fim, alterou-se a dimensão da largura do canal, de 25 mm para 10 mm, manteve-se a altura do canal como 5 mm e aumentou-se a espessura da camada de polímero semitransparente para 15 mm.

Os resultados para esta análise podem ser vistos na figura 6.15 e na tabela 6.9.

Naturalmente, estes resultados fazem mais sentido quando observados ao lado do caso de referência. Por este motivo, a figura 6.16 e a tabela 6.10 cumprem esta função, deixando claro os ganhos de desempenho.

O parâmetro linear de perda de calor, quando comparado com o caso referência, teve uma redução de mais 30 % para ambos os mode-

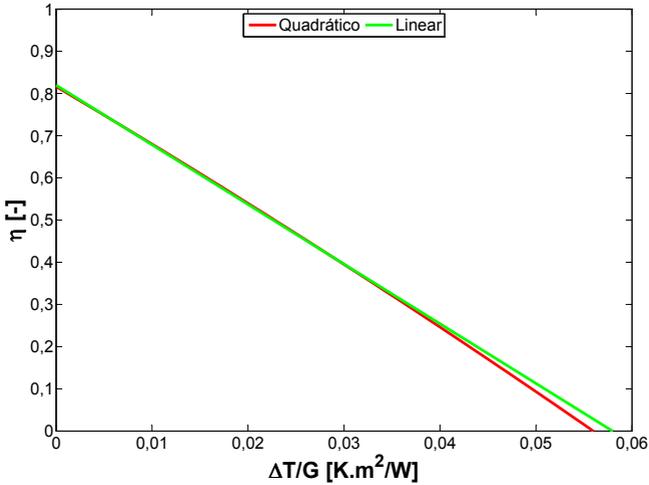


Figura 6.15: Curvas de desempenho obtidas numericamente de uma configuração pré-otimizada para os modelos quadrático e linear.

Tabela 6.9: Parâmetros de desempenho obtidos numericamente de uma configuração pré-otimizada para os modelos quadrático e linear.

Parâmetro	Unidade	Modelo	
		Linear	Quadrático
$F_R(\tau\alpha)K_b$	-	0,919	0,918
$F_R(\tau\alpha)K_d$	-	0,257	0,239
$F_R U_L$	$W/m^2.K$	14,13	13,41
$F_R U_{L,T}$	$W/m^2.K^2$	-	0,021

los. Para o caso do modelo quadrático, houve uma redução de 50 % no parâmetro quadrático de perda de calor. Os parâmetros de ganho de calor apresentaram um ganho que supera os 5 % para a radiação direta, mas uma redução de mais de 30 % para a radiação difusa. Este comportamento do parâmetro de ganho de calor para a radiação difusa trata-se de uma inconsistência da regressão. Posto que esta componente tem pouca participação no procedimento de teste em regime permanente, a regressão acaba por subestimá-la. Todavia, esta constatação não invalida a curva de desempenho obtida, bastando observar o ponto onde as curvas interceptam o eixo das ordenadas para verificar o crescimento do parâmetro de ganho de calor do coletor solar.

A comparação da curva de desempenho da configuração pré-otimizada e da referência para o modelo quadrático pode ser vista na figura 6.16 e os parâmetros de desempenho para ambos os modelos podem ser vistos na tabela 6.10.

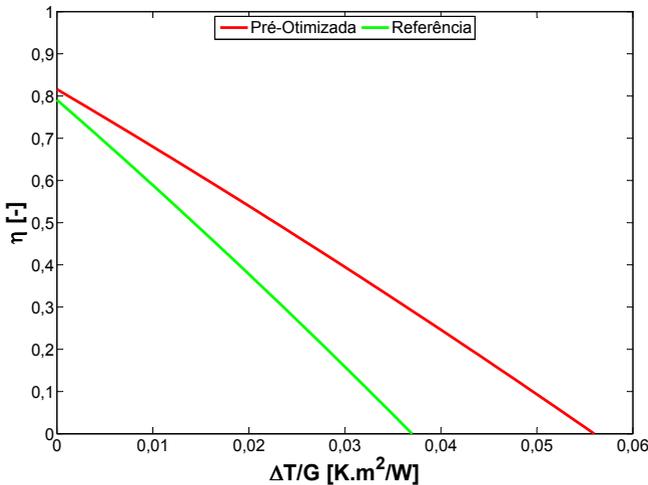


Figura 6.16: Curvas de desempenho obtidas numericamente das configurações de referência e pré-otimizada para o modelo quadrático.

Tabela 6.10: Parâmetros de desempenho obtidos numericamente das configurações de referência e pré-otimizada para os modelos quadrático e linear.

Parâmetro	Linear		Quadrático	
	Ref.	Pré-Otim.	Ref.	Pré-Otim.
$F_R(\tau\alpha)K_b$	0,871	0,919	0,868	0,918
$F_R(\tau\alpha)K_d$	0,394	0,257	0,357	0,239
$F_R U_L$	21,307	14,134	19,806	13,410
$F_R U_{L,T}$	-	-	0,042	0,021

6.9 Considerações finais

É indiscutível o ganho de desempenho provocado por alterações de parâmetros construtivos do coletor solar duopolimérico, sejam estas pela modificação da geometria dos canais ou pela seleção adequada dos materiais para compor o equipamento. As análises de sensibilidade permitem obter maior entendimento do efeito das variáveis sobre o desempenho do coletor e, assim, possibilitam uma opinião abalizada que culmina na configuração pré-otimizada apresentada neste capítulo. Tem-se ciência que esta não deve ser a melhor configuração possível a ser obtida, principalmente, porque, caso fosse desejado aprimorar esta, as análises de sensibilidade teriam de ser refeitas, a fim de atualizar o efeito de cada variável na nova configuração do coletor solar duopolimérico. Neste caso, para uma otimização mais elucidativa abrangendo os efeitos de cada uma das variáveis, assim como os seus efeitos cruzados, um método mais detalhado tem de ser usado, por exemplo, o método da superfície de resposta (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). No entanto, esta não será abordada, ficando como sugestão para uma próxima investigação.

Acredita-se que o objetivo da análise de sensibilidade deste capítulo: explorar as potencialidades do coletor solar duopolimérico, tenha sido atingido, mesmo que não com uma configuração otimizada em versão final. Prova disto é a figura 6.17 que compara as curvas de desempenho dos coletores solares duopolimérico (configuração pré-otimizada), de placa plana vidro-metálico e polimérico; todos feitos no Brasil. Mais uma vez, reforça-se o potencial dos coletores solares duopoliméricos e estimula-se a elaboração de investigações desta configuração.

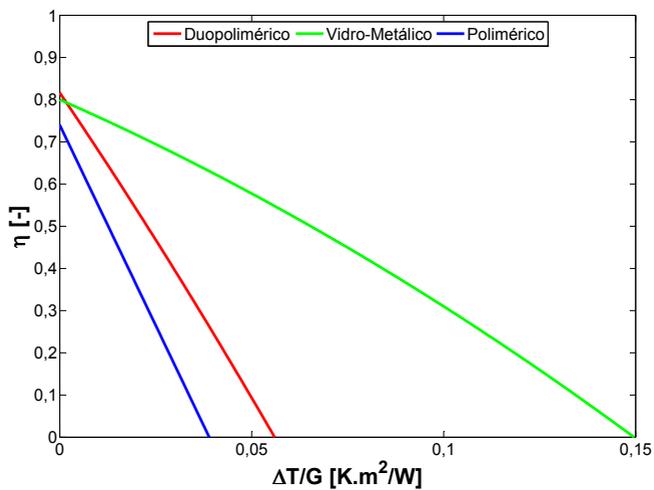


Figura 6.17: Curvas de desempenho para os coletores solares duopolimérico e seus concorrentes: polimérico e vidro-metálico.

7 Conclusões

Desde a elaboração da revisão bibliográfica (Capítulo 2) até chegar às análises de sensibilidade (Capítulo 6), é evidente o potencial que coletores solares poliméricos tem para o aquecimento de água.

A proposta estudada neste trabalho difere um pouco das tradicionalmente comercializadas e se baseia em configurações semelhantes propostas por vários autores de variadas regiões do mundo. A alternativa deste equipamento, batizada de coletor solar duopolimérico, consiste em involucrar um fluxo de água por duas camadas poliméricas, em que a camada superior (que recebe a radiação solar) é transparente e a inferior (que está em contato com o telhado, por exemplo) é opaca. Frente a configuração tradicional, em que ambas as camadas são opacas, percebe-se, prontamente, a exclusão de uma resistência térmica entre a radiação solar e a água, assim como para a radiação térmica (vinda da água) e o ambiente.

A fim de estudar com profundidade a proposta, primeiramente, buscou-se na literatura uma gama de modelos matemáticos para representar os fenômenos que ocorrem nesta (Capítulo 3). Feito isto, confeccionou-se um algoritmo computacional para simular os fenômenos em questão e avaliaram-se os erros numéricos que podem surgir devido a alguns parâmetros arbitrários (Capítulo 4). Após, conduziu-se um ensaio experimental com um protótipo do coletor, a fim de verificar o desempenho deste na prática e, também, validar o algoritmo computacional construído (Capítulo 5). Por fim, análises de sensibilidade foram conduzidas para identificar os parâmetros construtivos com maior relevância frente ao desempenho do coletor solar duopolimérico (Capítulo 6).

As análises de sensibilidade conduzidas resultaram em indicadores para buscar o aumento de desempenho. Primeiramente, sabe-se que a soma das perdas por convecção pode ser superior a das perdas por radiação, mesmo em temperaturas altas de operação. A mudança da geometria do canal pode trazer benefícios para a curva de desem-

penho, através da redução de sua largura e/ou aumento de sua altura. Evidentemente, a redução da condutividade térmica de qualquer um dos polímeros é positiva para a curva de desempenho, todavia, este valor para o polímero semitransparente tem maior relevância que para o polímero opaco. Tratando-se das espessuras ópticas, que são as responsáveis por ditar como a radiação (tanto solar como térmica) se comportará, deve-se priorizar uma espessura óptica solar pequena, uma vez que as espessuras ópticas térmicas para polímeros são, normalmente, grandes. E, finalmente, deve-se ter cautela com a espessura do polímero semitransparente, dimensão que, por afetar tanto os parâmetros de ganho como os de perda de calor, pode alterar a faixa de operação mais adequada de um coletor solar.

Com estas informações, selecionando-se diferentes materiais e fazendo algumas modificações na geometria, possibilitou-se um grande salto na curva de desempenho do coletor solar proposto, qual seja um acréscimo de 3 % no parâmetro global de ganho de calor e uma redução de mais de 30 % no parâmetro de perda de calor.

Contudo, o aprimoramento descrito neste texto, com certeza, é uma pequena parte do universo de configurações e alternativas que podem ser estudadas. Neste sentido, acredita-se que o trabalho cumpre o papel de endossar o potencial da tecnologia de coletor solares duopoliméricos e provocar o interesse nesta.

7.1 Sugestões para próximos trabalhos

O trabalho em questão tentou abordar, de forma profunda, mas bastante ampla, os coletores solares duopoliméricos. No entanto, vários trabalhos são de grande valia para avançar no entendimento destes equipamentos.

A primeira sugestão para próximos trabalhos é a de realizar uma otimização da configuração apresentada para coletores solares duopoliméricos avaliando de forma holística o efeito combinado dos parâmetros construtivos na curva de desempenho.

Ainda, uma série de sugestões de melhorias na configuração do coletor solar duopolimérico pode ser avaliada. A primeira é a utilização não de uma, mas de duas coberturas de polímero semitransparente ou, até, de polímeros injetados com bolhas de ar. No mesmo sentido, pode ser avaliado o uso de estruturas alveolares¹) como coberturas, uma vez que estas tem o mesmo propósito da sugestão anterior. Por

¹Em inglês, *honeycombs*.

fim, a camada de polímero opaco, da mesma forma, poderia ser composta por um sanduíche de polímero-ar-polímero, ou ser constituída de polímeros com bolhas de ar injetadas. Todas estas sugestões visam o aprimoramento da curva de desempenho e/ou a redução de custo por economia de material.

A terceira sugestão é a avaliação econômica de uma configuração (ou várias configurações) do coletor solar polimérico, visando identificar o custo total do equipamento e as modificações almejadas para reduzir este, obtendo um melhor retorno sobre o investimento quando este coletor for instalado.

Finalmente, sugere-se avaliar o desempenho dos coletores solares duopoliméricos para diferentes aplicações e em diferentes regiões, buscando identificar o melhor nicho de aplicações e as regiões mais interessantes para este ser utilizado.

Referências Bibliográficas

ABDELSALAM, M. A multipurpose shallow solar pond (mssp). **Solar & Wind Technology**, v. 1, n. 3, p. 167 – 174, 1984. ISSN 0741-983X.

ABNT. **NBR ISO 724:2004 Rosca métrica ISO de uso geral - Dimensões básicas**. janeiro 2005.

ABNT. **NBR ISO 965-1:2004 Rosca métrica ISO de uso geral - Tolerâncias Parte 1: Princípios e dados básicos**. janeiro 2005.

ABNT. **ABNT NBR 15747-2:2009 Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares**. setembro 2009.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 3rd. ed. [S.l.]: Wiley, 2004. ISBN 9780471271505.

BODEN, T.; ANDRES, B. **Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2010**. [S.l.], Julho 2013.

DASOL-ABRAVA. **Dados de Mercado**. 2013. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/>>.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**. [S.l.]: Pergamon Press, 1961. (Physical Oceanography, v. 1).

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed. [S.l.]: Wiley, 2013. 936 p.

DUNKLE, R. V. Geometric mean beam lengths for radiant heat-transfer calculations. **Journal of Heat Transfer**, v. 1, p. 75–80, 1964.

FISCHER, S.; HEIDEMANN, W.; MULLER-STEINHAGEN, H.; PERRERS, B.; BERGQUIST, P.; HELLSTROM, B. Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the european standard {EN} 12975-2. **Solar Energy**, v. 76, n. 1-3, p. 117 – 123, 2004. ISSN 0038-092X. Solar World Congress 2001.

GONZÁLEZ, J.; PÉREZ, L.; BENÍTEZ, J. Modeling the thermal process in a shallow solar pond water heater. **Solar Energy**, v. 48, n. 4, p. 261 – 265, 1992. ISSN 0038-092X.

GOODFELLOW, G. **Material Properties Catalogue**. jan 2014. Meio Eletrônico. Disponível em: <<http://www.goodfellow.com/>>.

GOPFFARTH, W.; DAVISON, R.; HARRIS, W.; BAIRD, M. Performance correlation of horizontal plastic solar water heaters. **Solar Energy**, v. 12, n. 2, p. 183 – 196, 1968. ISSN 0038-092X.

HARRIS, W.; DAVISON, R.; HOOD, D. Design and operating characteristics of an experimental solar water heater. **Solar Energy**, v. 9, n. 4, p. 193 – 196, 1965. ISSN 0038-092X.

HENNINGER, J. H. Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal control coatings. **NASA Reference Publication**, v. 1121, p. 47, 1984.

HOWELL, J. R.; SIEGEL, R.; MENGÜÇ, M. P. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 5. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 957 p.

IEA. **Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling**. [S.l.], 2012.

IEA. **Key World Energy Statistics**. [S.l.], 2013.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. [S.l.], 2013.

ISO. **ISO 3601-2:2008: Fluid power systems – O-rings – Part 2: Housing dimensions for general applications**. 2008.

JANJAI, S.; ESPER, A.; MUHLBAUER, W. Modelling the performance of a large area plastic solar collector. **Renewable Energy**, v. 21, n. 3-4, p. 363 – 376, 2000. ISSN 0960-1481.

JERLOV, N. G. **Optical Oceanography**. [S.l.]: Elsevier Publishing Co., 1968.

JÜRGES, W. Der wärmeübergang an einer ebenen wand. beihefte. **Gesundheits-Ingenieur**, v. 1, 1924.

KAKAC, S.; SHAH, R. K.; AUNG, W. (Ed.). **Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer**. [S.l.]: Wiley, 1987.

KAUSHIK, N.; BANSAL, P.; SODHA, M. Partitioned solar pond collector/storage system. **Applied Energy**, v. 7, n. 1-3, p. 169 – 190, 1980. ISSN 0306-2619.

KHANNA, M. L. A portable-type solar water heater. **Solar Energy**, v. 15, n. 3, p. 269 – 272, 1973. ISSN 0038-092X.

KISHORE, V.; GANDHI, M.; RAO, K. Experimental and analytical studies of shallow solar pond systems with continuous heat extraction. **Solar Energy**, v. 36, n. 3, p. 245 – 256, 1986. ISSN 0038-092X.

KISHORE, V.; RAO, V. R.; RAMAN, P. A portable shallow solar pond water heater. **Solar & Wind Technology**, v. 4, n. 2, p. 201 – 204, 1987. ISSN 0741-983X.

KRATZENBERG, M.; BEYER, H.; COLLE, S. Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test. **Solar Energy**, v. 80, n. 11, p. 1453 – 1462, 2006. ISSN 0038-092X. European Solar Conference (EuroSun 2004) EuroSun Conference 2004.

KUDISH, A.; WOLF, D. A compact shallow solar pond hot water heater. **Solar Energy**, v. 21, n. 4, p. 317 – 322, 1978. ISSN 0038-092X.

KUMAR, S.; MULLICK, S. Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. **Solar Energy**, v. 84, n. 6, p. 956 – 963, 2010. ISSN 0038-092X.

MARTIN, M.; BERDAHL, P. Characteristics of infrared sky radiation in the united states. **Solar Energy**, v. 33, n. 3-4, p. 321 – 336, 1984. ISSN 0038-092X.

MATHIOULAKIS, E.; VOROPOULOS, K.; BELESSIOTIS, V. Assessment of uncertainty in solar collector modeling and testing. **Solar Energy**, v. 66, n. 5, p. 337 – 347, 1999. ISSN 0038-092X.

MATHWORKS. **Matlab R2011b**. 2011.

MAUTHNER, F.; WEISS, W. **Solar Heat Worldwide: Market and Contribution to the Energy Supply 2011**. [S.l.], 2013.

MCADAMS, W. **Heat transmission**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1954. (McGraw-Hill series in chemical engineering).

METROLOGY, J. C. for Guides in. **JCGM 100: Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. [S.l.], 2008.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003.

O'BRIEN-BERNINI, F. C.; MCGOWAN, J. G. Performance modeling of non-metallic flat plate solar collectors. **Solar Energy**, v. 33, n. 3-4, p. 305 – 319, 1984. ISSN 0038-092X.

PALMER, K. F.; WILLIAMS, D. Optical properties of water in the near infrared. **J. Opt. Soc. Am.**, OSA, v. 64, n. 8, p. 1107–1110, Aug 1974.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.

PERERS, B. An improved dynamic solar collector test method for determination of non-linear optical and thermal characteristics with multiple regression. **Solar Energy**, v. 59, n. 4-6, p. 163 – 178, 1997. ISSN 0038-092X. Selected Proceeding of {ISES} 1995: Solar World Congress. Part {IV}.

PETTIT, R.; SOWELL, R. R. Solar absorptance and emittance properties of several solar coatings. **Journal of Vacuum Science and Technology**, v. 13, n. 2, p. 596–602, 1976. ISSN 0022-5355.

RABL, A.; NIELSEN, C. E. Solar ponds for space heating. **Solar Energy**, v. 17, n. 1, p. 1 – 12, 1975. ISSN 0038-092X.

SHAH, R.; SEKULIĆ, D. **Fundamentals of heat exchanger design**. [S.l.]: Wiley, 2003.

SHARPLES, S.; CHARLESWORTH, P. Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector. **Solar Energy**, v. 62, n. 2, p. 69 – 77, 1998. ISSN 0038-092X.

SODHA, M.; BANSAL, N.; HRISHIKESHAN, D.; BANSAL, P. A study of plastic shallow solar pond water heater for domestic applications. **Solar Energy**, v. 34, n. 6, p. 505 – 512, 1985. ISSN 0038-092X.

SODHA, M.; TIWARI, G.; NAYAK, J. Shallow solar pond water heater: An analytical study. **Energy Conversion and Management**, v. 21, n. 2, p. 137 – 139, 1981. ISSN 0196-8904.

SPENCER, J. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, v. 2, p. 172, 1971.

TEST, F. L.; LESSMAN, R. C. L.; JOHARY, A. Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in natural environment. **Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer**, v. 103, p. 262–267, 1981.

THEKAEKARA, M. P. Solar irradiance: total and spectral and its possible variations. **Appl. Opt.**, OSA, v. 15, n. 4, p. 915–920, Apr 1976.

TSILINGIRIS, P. Design, analysis and performance of low-cost plastic film large solar water heating systems. **Solar Energy**, v. 60, n. 5, p. 245 – 256, 1997. ISSN 0038-092X.

TSILINGIRIS, P. Back absorbing parallel plate polymer absorbers in solar collector design. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 1, p. 135 – 150, 2002. ISSN 0196-8904.

TSILINGIRIS, P. T. An accurate upper estimate for the transmission of solar radiation in salt gradient ponds. **Solar Energy**, v. 40, n. 1, p. 41 – 48, 1988. ISSN 0038-092X.

VLIET, G. C.; ROSS, D. C. Turbulent natural convection on upward and downward facing inclined heat flux surfaces. **Journal of Heat**, v. 97, p. 549–555, 1975.

WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S.; PROCTOR, D. Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. **COMPLES 2**, v. 2, p. 56, 1977.

YUEN, W. W.; WONG, L. W. Analysis of radiative equilibrium in a rectangular enclosure with gray medium. **Journal of Heat Transfer**, v. 2, p. 433–440, May 1984.

Apêndice A – Discretização da Primeira Lei da Termodinâmica

Nas seções deste apêndice encontram-se as equações da primeira lei da termodinâmica discretizadas em volumes finitos. Tendo em vista as diferentes condições de contorno a que estes volumes estão sujeitos, são apresentados oito tipos de conjunto de condições de contorno, os quais são suficientes para a caracterização de todos os volumes finitos do problema proposto, bastando, em alguns casos, modificar as fronteiras em que as condições de contorno são aplicadas.

A.1 Tipo 1

Condição de contorno de condução nas quatro fronteiras.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{k_N}{\Delta y_C^2 + \Delta y_N \Delta y_C} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} + \frac{k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} \right] T_C \\
 & - \frac{2k_N}{\Delta y_C^2 + \Delta y_N \Delta y_C} T_N - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L \\
 & - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S - \frac{2k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} T_O = \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

A.2 Tipo 2

Condição de contorno de fluxo prescrito igual a zero na fronteira oeste e de condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{k_N}{\Delta y_C^2 + \Delta y_N \Delta y_C} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} \right] T_C - \frac{2k_N}{\Delta y_C^2 + \Delta y_N \Delta y_C} T_N \\
 & - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S = \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

A.3 Tipo 3

Condição de contorno de convecção na fronteira norte e de condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{hk_C}{\Delta y_C(\Delta y_C h + 2k)} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} + \frac{k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} \right] T_C \\
 & - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S \\
 & - \frac{2k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} T_O = \frac{h}{\Delta y_C} \left(\frac{h T_{amb} \Delta y_C}{2k + h \Delta y_C} - T_{amb} \right) + \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

A.4 Tipo 4

Condição de contorno de convecção na fronteira norte e de condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{hk_C}{\Delta y_C(\Delta y_C h + 2k)} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} + \frac{k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} \right] T_C \\
 & - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S \\
 & - \frac{2k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} T_O = \frac{h}{\Delta y_C} \left(\frac{h T_{amb} \Delta y_C}{2k + h \Delta y_C} - T_{amb} \right) + \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.4}$$

A.5 Tipo 5

Condição de contorno de mudança de condutividade térmica e incidência solar na fronteira norte e condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} + \frac{k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} \right] T_C \\
 & - \frac{2k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} T_N - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L \\
 & - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S - \frac{2k_O}{\Delta x_C^2 + \Delta x_O \Delta x_C} T_O \\
 & = \frac{G_{b,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \frac{G_{d,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

A.6 Tipo 6

Condição de contorno de convecção na fronteira norte, de fluxo prescrito igual a zero na fronteira oeste e de condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{hk_C}{\Delta y_C(\Delta y_C h + 2k)} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} \right] T_C - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L \\
 & - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S = \frac{h}{\Delta y_C} \left(\frac{hT_{amb} \Delta y_C}{2k + h\Delta y_C} - T_{amb} \right) + \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.6}$$

A.7 Tipo 7

Condição de contorno de fluxo prescrito igual a zero na fronteira oeste, mudança de condutividade térmica e incidência solar na fronteira norte e de condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} + \frac{k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} \right] T_C - \frac{2k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} T_N \\
 & - \frac{2k_L}{\Delta x_C^2 + \Delta x_L \Delta x_C} T_L - \frac{2k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S \\
 & = \frac{G_{b,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \frac{G_{d,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \dot{q}_{ger}
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

A.8 Tipo 8

Condição de contorno de mudança de condutividade térmica e incidência solar na fronteira norte, de convecção na fronteira leste e de

condução nas demais.

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\frac{k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} + \frac{h k_C}{\Delta x_C (\Delta x_C h + 2 k_C)} \right. \\
 & \left. + \frac{k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} \right] T_C - \frac{2 k_C k_N}{k_N \Delta y_C^2 + k_C \Delta y_N \Delta y_C} T_N \\
 & - \frac{2 k_S}{\Delta y_C^2 + \Delta y_S \Delta y_C} T_S = \frac{h}{\Delta x_C} \left(\frac{h T_{\text{agua}} \Delta x_C}{2k + h \Delta x_C} - T_{\text{amb}} \right) \\
 & \frac{G_{b,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \frac{G_{d,(\tau\alpha)}}{\Delta y_C} + \dot{q}_{\text{ger}}
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

Apêndice B – Equação da Intensidade Média de Radiação Incidente

Este apêndice tem por objetivo desdobrar a equação da intensidade média de radiação incidente em um meio participante até que esta esteja em uma forma adequada para ser aplicada no modelo matemático a ser desenvolvido.

Parte-se da equação 3.62, que é repetida abaixo,

$$\begin{aligned} \bar{I}(\mathbf{r}) = & \frac{1}{4\pi} \int_A I(\mathbf{r}_0) \frac{[\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)]}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3} \exp(-\beta |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|) dA_0 \\ & + \frac{\beta}{4\pi} \int_V \hat{I}(\mathbf{r}^*) \frac{\exp(-\beta |\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|^2} dV^* \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

onde \mathbf{r} é o vetor posição do ponto de interesse, \mathbf{r}_0 é o vetor posição de pontos localizados nas fronteiras e \mathbf{r}^* é o vetor posição de pontos localizados no interior do meio. Transformando esta equação para coordenadas cartesianas, tem-se

$$\begin{aligned} \bar{I}(x, y, z) = & \frac{1}{4\pi} \int_A I(x_0, y_0, z_0) \frac{\mathbf{n} \cdot (x - x_0, y - y_0, z - z_0)}{\{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\ & \dots \exp\{-\beta [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\} dA_0 \\ & + \frac{\beta}{4\pi} \int_V \hat{I}(x^*, y^*, z^*) \frac{\exp\{-\beta [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\{[(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^2} dV^* \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Haja vista que o fluxo de radiação solar é uniforme em toda a extensão do coletor solar duopolimérico, e desconsiderando os efeitos de borda nas extremidades do polímero semitransparente, pode-se

concluir que a intensidade média de radiação incidente é fruto de um fenômeno bidimensional no plano $x - y$.

Desta maneira, a equação B.2 que contemplaria seis fronteiras, passa a considerar somente quatro. Ainda, visto que simula-se somente um dos canais do coletor solar duopolimérico, deve-se aplicar condições de contorno nas fronteiras dos canais adjacentes. Decidiu-se por conceber estas fronteiras como perfeitamente especulares, uma vez que, desta forma, a radiação que é refletida nestas fronteiras é idêntica a que viria dos canais adjacentes. Em suma, há somente duas fronteiras para serem analisadas: a da interface ar-polímero semitransparente e a da interface polímero semitransparente-água, que é a mesma da interface polímero semitransparente-polímero opaco. As fronteiras consideradas perfeitamente especulares são incluídas na análise através do uso do método de traçado de raio e construção de imagens.

Prosseguindo, a figura B.1 ilustra o cenário considerado para resolução, assim como o eixo de coordenadas considerado. Assim, a equação B.2 resume-se a

$$\begin{aligned}
 \bar{I}(x,y) = & \frac{1}{4\pi} \int_{-X}^X \int_{-\infty}^{\infty} I(x_0, -Y) \frac{[(0,1,0) \cdot (x - x_0, y + Y, -z_0)]}{\{[(x - x_0)^2 + (y + Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\
 & \dots \exp\{-\beta [(x - x_0)^2 + (y + Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\} dz_0 dx_0 \\
 & + \frac{1}{4\pi} \int_{-X}^X \int_{-\infty}^{\infty} I(x_0, Y) \frac{[(0,1,0) \cdot (x - x_0, y - Y, -z_0)]}{\{[(x - x_0)^2 + (y - Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\
 & \dots \exp\{-\beta [(x - x_0)^2 + (y - Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\} dz_0 dx_0 \\
 & + \frac{\beta}{4\pi} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_{-\infty}^{\infty} \hat{I}(x^*, y^*, z^*) \frac{\exp\{-\beta [(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\{[(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \\
 & \hspace{15em} (B.3)
 \end{aligned}$$

Tendo em vista que as expressões contidas nas duas integrais duplas e na integral tripla são funções pares, realizando a operação de

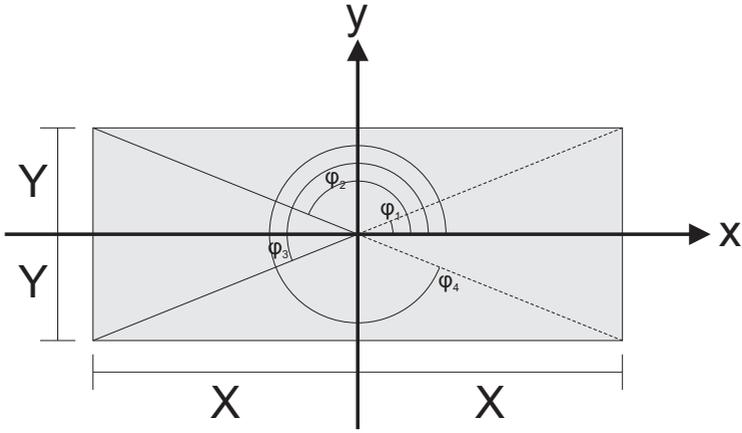


Figura B.1: Sistema de coordenadas e limites de integração para a equação da intensidade média de radiação incidente.

produto escalar e simplificando alguns termos,

$$\begin{aligned}
 \bar{I}(x,y) &= \frac{2}{4\pi} \int_{-X}^X \int_0^{\infty} I(x_0, -Y)(y+Y) \dots \\
 &\dots \frac{\exp\{-\beta [(x-x_0)^2 + (y+Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\{[(x-x_0)^2 + (y+Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} dz_0 dx_0 \\
 &+ \frac{2}{4\pi} \int_{-X}^X \int_0^{\infty} I(x_0, Y)(y-Y) \dots \\
 &\dots \frac{\exp\{-\beta [(x-x_0)^2 + (y-Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\{[(x-x_0)^2 + (y-Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} dz_0 dx_0 \\
 &+ \frac{2\beta}{4\pi} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_0^{\infty} \hat{I}(x^*, y^*, z^*) \dots \\
 &\dots \frac{\exp\{-\beta [(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\{[(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3}
 \end{aligned} \tag{B.4}$$

Aplica-se a transformação sugerida por Howell *et al.* (2011) que

para a primeira integral é

$$\epsilon_1 = \frac{z_0}{\rho_1} \tag{B.5}$$

onde

$$\rho_1 = \left[(x - x_0)^2 + (y + Y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{B.6}$$

Com isto, obtém-se

$$\frac{2}{4\pi} \int_{-X}^X \int_0^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{\exp\{-\beta [\rho_1^2 + \rho_1^2 \epsilon_1^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[\rho_1^2 + \rho_1^2 \epsilon_1^2]^{\frac{3}{2}}} \rho_1 d\epsilon_1 dx_0 \tag{B.7}$$

ou, colocando em evidência ρ_0^2 , retirando este da potenciação e cor-tando os iguais no numerador e denominador,

$$\frac{2}{4\pi} \int_{-X}^X \int_0^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{\exp\{-\beta \rho_1 [1 + \epsilon_1^2]^{\frac{1}{2}}\}}{\rho_1^2 [1 + \epsilon_1^2]^{\frac{3}{2}}} d\epsilon_1 dx_0 \tag{B.8}$$

Novamente, utiliza-se a transformação sugerida por Howell *et al.* (2011),

$$t_1 = (1 + \epsilon_1^2)^{\frac{1}{2}} \tag{B.9}$$

e, assim,

$$\frac{2}{4\pi} \int_{-X}^X \int_1^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{\exp\{-\beta \rho_1 t_1\}}{\rho_1^2 t_1^3} \frac{t_1}{(t_1^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} dt_1 dx_0 \tag{B.10}$$

ou, ainda, com algumas simplificações,

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-X}^X \int_1^{\infty} I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{\exp\{-\beta \rho_1 t_1\}}{\rho_1^2 t_1^2 (t_1^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} dt_1 dx_0 \quad (\text{B.11})$$

Por fim, verifica-se a semelhança de parte da expressão com a função bidimensional de radiação ¹, S_n ,

$$S_n(x) = \frac{2}{\pi} \int_1^{\infty} \frac{e^{-xt}}{t^n (t^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} dt \quad (\text{B.12})$$

que leva a

$$\frac{y + Y}{4} \int_{-X}^X I(x_0, -Y) \frac{S_2(\beta \rho_1)}{\rho_1^2} dx_0 \quad (\text{B.13})$$

Usando-se de transformações semelhantes para as outras integrais, a equação B.4 modifica-se para

$$\begin{aligned} \bar{I}(x, y) = & \frac{y + Y}{4} \int_{-X}^X I(x_0, -Y) \frac{S_2(\beta \rho_1)}{\rho_1^2} dx_0 \\ & + \frac{y - Y}{4} \int_{-X}^X I(x_0, Y) \frac{S_2(\beta \rho_2)}{\rho_2^2} dx_0 \\ & + \frac{\beta}{4} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \hat{I}(x^*, y^*) \frac{S_1(\beta \rho^*)}{\rho^*} dy^* dx^* \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

A equação C.14, em linhas gerais, estaria pronta para ser aplicada a situação proposta. No entanto, inclusive como citado em Howell *et al.* (2011), pode-se observar que esta acarretaria problemas em sua resolução numérica quando o denominador – nomeadamente, as variáveis ρ_1, ρ_2 e ρ^* – aproxima-se de zero, fazendo com que a expressão dentro da integral tenda ao infinito. Neste sentido, recorreu-se as transformações sugeridas por Yuen e Wong (1984) que mudam as coordenadas de cartesianas para cilíndricas e conseguem solucionar o problema numérico citado.

¹Em inglês, *two-dimensional radiation function*.

Por uma questão de compatibilidade e comparabilidade com o trabalho de Yuen e Wong (1984), primeiramente, adimensionaliza-se as equações através das relações

$$\eta = \frac{x}{X}, \tag{B.15}$$

$$\zeta = \frac{y}{Y}, \tag{B.16}$$

$$L_1 = 2\beta X, \tag{B.17}$$

$$L_2 = 2\beta Y \tag{B.18}$$

e

$$d(\eta', \zeta') = \frac{1}{2} [L_1^2 (\eta - \eta')^2 + L_2^2 (\zeta - \zeta')^2] \tag{B.19}$$

Obtendo, assim:

$$\begin{aligned} \bar{I}(\eta, \zeta) &= \frac{L_1 L_2 (\zeta + 1)}{16} \int_{-1}^1 I(\eta_0, -1) \frac{S_2 [d(\eta_0, -1)]}{d(\eta_0, -1)^2} d\eta_0 \\ &\quad \frac{L_1 L_2 (\zeta - 1)}{16} \int_{-1}^1 I(\eta_0, 1) \frac{S_2 [d(\eta_0, 1)]}{d(\eta_0, 1)^2} d\eta_0 \\ &\quad \frac{L_1 L_2}{16} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{I}(\eta^*, \zeta^*) \frac{S_1 [d(\eta^*, \zeta^*)]}{d(\eta^*, \zeta^*)^2} d\zeta^* d\eta^* \end{aligned} \tag{B.20}$$

E, por fim, usam-se as seguintes transformações,

$$\eta = \eta' + \frac{2r}{L_1} \cos \phi \tag{B.21}$$

$$\zeta = \zeta' + \frac{2r}{L_2} \sin \phi \quad (\text{B.22})$$

que, quando aplicadas a equação original, resultam em,

$$\begin{aligned} \bar{I}(\eta, \zeta) &= \frac{1}{4} \int_{\phi_1}^{\phi_2} I(\eta_0, -1) S_2 \left[\frac{(\zeta + 1)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \\ &+ \frac{1}{4} \int_{\phi_3}^{\phi_4} I(\eta_0, 1) S_2 \left[\frac{(\zeta - 1)L_2}{2 \sin \phi} \right] d\phi \\ &+ \frac{1}{4} \int_{\phi^*} \int_{r^*} I_b(r^*, \phi^*) S_1(r^*) dr^* d\phi^* ; \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

Finalmente, a equação B.23 pode ser aplicada para a resolução numérica do perfil térmico do coletor proposto sem que haja situações que apresentem singularidades. Todavia, deve-se tomar cuidado com os limites de integração das duas primeiras integrais – ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 – que são obtidos através da geometria do coletor solar, assim como o correto cálculo do raio na terceira integral, que é função do ângulo ϕ e limitado pela geometria do coletor.

Apêndice C – Equação do Fluxo Radiativo

Este apêndice tem por objetivo desdobrar a equação do fluxo radiativo em um meio participante até que esta esteja em uma forma adequada para ser aplicada no modelo matemático a ser desenvolvido.

Parte-se da equação 3.62, que é repetida abaixo,

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(\mathbf{r}) = & \int_A I(\mathbf{r}_0) [\mathbf{n} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)] \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^4} e^{-\beta|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} dA_0 \\ & + \beta \int_V \hat{I}(\mathbf{r}^*) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}^*}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|^3} e^{-\beta|\mathbf{r} - \mathbf{r}^*|} dV^* \end{aligned} \quad (\text{C.1})$$

onde \mathbf{r} é o vetor posição do ponto de interesse, \mathbf{r}_0 é o vetor posição de pontos localizados nas fronteiras e \mathbf{r}^* é o vetor posição de pontos localizados no interior do meio. Transformando esta equação para coordenadas cartesianas, tem-se

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(x,y,z) = & \int_A I(x_0,y_0,z_0) [\mathbf{n} \cdot (x - x_0, y - y_0, z - z_0)] \dots \\ & \dots \frac{(x - x_0, y - y_0, z - z_0)}{\{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^4} \dots \\ & \dots e^{-\beta[(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}} dA_0 \\ & + \beta \int_V \hat{I}(x^*,y^*,z^*) \frac{(x - x^*, y - y^*, z - z^*)}{\{[(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\ & \dots e^{-\beta[(x-x^*)^2+(y-y^*)^2+(z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}} dV^* . \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

Tendo em vista a opacidade do polímero semitransparente à radiação térmica, assim como o baixo gradiente de temperaturas na direção z – que é a do fluxo da água – decidiu-se por considerar o fluxo radiativo térmico como um fenômeno bidimensional. De outra forma, isto significa que, dado um ponto ou seção de interesse no plano $x - y$, o perfil térmico das seções adjacentes (também no plano $x - y$) é muito semelhante, até onde, termicamente falando, consegue-se enxergar. Esta bidimensionalidade, em termos matemáticos, traduz-se nas coordenadas do ponto de interesse, com $z = 0$, e nos limites das coordenadas das fronteiras e do volume do sólido, com $-\infty < z_0 < \infty$ e $-\infty < z^* < \infty$.

Isto posto, as relações que antes contemplariam seis fronteiras passam a considerar somente quatro fronteiras. Adicionalmente, dado que não simula-se o coletor solar com todos os seus canais, mas, sim, somente um destes, e assim como aplicado para a radiação solar no polímero semitransparente, por meio do método da radiação líquida, concebe-se que as fronteiras limitadas por essa simplificação de simetria são superfícies perfeitamente especulares. Em resumo, restam somente duas fronteiras para serem avaliadas: a da interface ar-polímero semitransparente e a da interface polímero semitransparente-água, que é a mesma da interface polímero semitransparente-polímero opaco; as outras duas fronteiras, consideradas perfeitamente especulares, são abrangidas através do uso do método de traçado de raio e construção de imagens.

Prosseguindo, a figura C.1 ilustra o cenário considerado para resolução, assim como o eixo de coordenadas considerado. Assim, a

equação C.2 resume-se a

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_r(x,y) = & \int_{-X}^X \int_{-\infty}^{\infty} I(x_0, -Y) [(0,1,0) \cdot (x-x_0, y+Y, -z_0)] \dots \\
 & \dots \frac{(x-x_0, y+Y, -z_0)}{\{[(x-x_0)^2 + (y+Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^4} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x_0)^2 + (y+Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}} dz_0 dx_0 \\
 & + \int_{-X}^X \int_{-\infty}^{\infty} I(x_0, Y) [(0,1,0) \cdot (x-x_0, y-Y, -z_0)] \dots \\
 & \dots \frac{(x-x_0, y-Y, -z_0)}{\{[(x-x_0)^2 + (y-Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}\}^4} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x_0)^2 + (y-Y)^2 + (-z_0)^2]^{\frac{1}{2}}} dz_0 dx_0 \\
 & + \beta \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_{-\infty}^{\infty} \hat{I}(x^*, y^*) \frac{(x-x^*, y-y^*, z-z^*)}{\{[(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}} dz^* dy^* dx^* .
 \end{aligned}
 \tag{C.3}$$

Tendo em vista que as expressões contidas nas duas integrais duplas e na integral tripla são funções pares, realizando a operação de

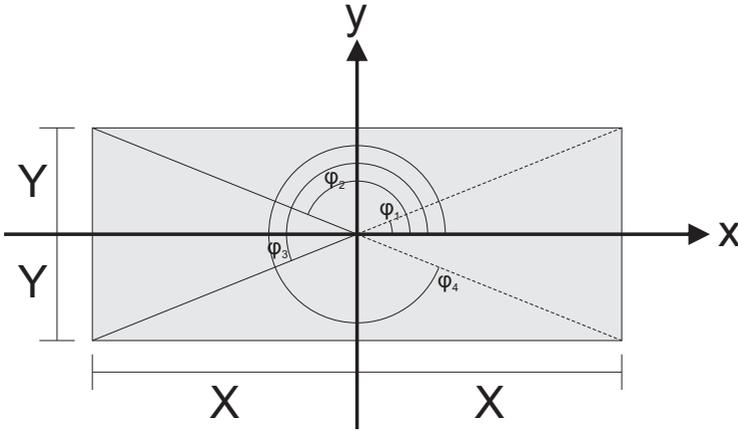


Figura C.1: Sistema de coordenadas e limites de integração para a equação do fluxo radiativo.

produto escalar e simplificando alguns termos,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_r(x, y) = & 2 \int_{-X}^X \int_0^{\infty} I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{(x - x_0, y + Y)}{[(x - x_0)^2 + (y + Y)^2 + z_0^2]^2} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x_0)^2 + (y+Y)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}}} dz_0 dx_0 \\
 & + 2 \int_{-X}^X \int_0^{\infty} I(x_0, Y) (y - Y) \frac{(x - x_0, y - Y)}{[(x - x_0)^2 + (y - Y)^2 + z_0^2]^2} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x_0)^2 + (y-Y)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}}} dz_0 dx_0 \\
 & + 2\beta \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_0^{\infty} \hat{I}(x^*, y^*) \frac{(x - x^*, y - y^*)}{\{[(x - x^*)^2 + (y - y^*)^2 + (z - z^*)^2]^{\frac{1}{2}}\}^3} \dots \\
 & \dots e^{-\beta[(x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2]^{\frac{1}{2}}} dz^* dy^* dx^* .
 \end{aligned} \tag{C.4}$$

Aplica-se a transformação sugerida por Howell *et al.* (2011) que

para a primeira integral é

$$\epsilon_1 = \frac{z_0}{\rho_1} \quad (C.5)$$

onde

$$\rho_1 = \left[(x - x_0)^2 + (y + Y)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.6)$$

Com isto, obtém-se

$$2 \int_{-X}^X \int_0^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{(x - x_0, y + Y)}{\left[\rho_1^2 + \rho_1^2 \epsilon_1^2 \right]^2} e^{-\beta \left[\rho_1^2 + \rho_1^2 \epsilon_1^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \rho_1 d\epsilon_1 dx_0 \quad (C.7)$$

ou, colocando em evidência ρ_0^2 , retirando este da potenciação e cortando os iguais no numerador e denominador ,

$$2 \int_{-X}^X \int_0^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{(x - x_0, y + Y)}{\rho_1^3 \left[1 + \epsilon_1^2 \right]^2} e^{-\beta \rho_1 \left[1 + \epsilon_1^2 \right]^{\frac{1}{2}}} d\epsilon_1 dx_0 \quad (C.8)$$

Novamente, utiliza-se a transformação sugerida por Howell *et al.* (2011),

$$t = \left(1 + \epsilon_1^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (C.9)$$

e, assim,

$$2 \int_{-X}^X \int_1^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{(x - x_0, y + Y)}{\rho_1^3 t^4} e^{-\beta \rho_1 t} \frac{t}{(t^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} dt dx_0 \quad (C.10)$$

ou, ainda, com algumas simplificações,

$$2 \int_{-X}^X \int_1^\infty I(x_0, -Y) (y + Y) \frac{(x - x_0, y + Y)}{\rho_1^3 t^3 (t^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} e^{-\beta \rho_1 t} dt dx_0 \quad (C.11)$$

Por fim, verifica-se a semelhança de parte da expressão com a função radiação bidimensional ¹, S_n ,

$$S_n(x) = \frac{2}{\pi} \int_1^{\infty} \frac{e^{-xt}}{t^n (t^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} dt \quad (C.12)$$

que leva a

$$\pi \int_{-X}^X I(x_0, -Y) (y + Y) (x - x_0, y + Y) \frac{S_3(\beta \rho_1)}{\rho_1^3} dx_0 \quad (C.13)$$

Usando-se de transformações semelhantes para as outras integrais, a equação C.4 modifica-se para

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(x, y) = & \pi \int_{-X}^X I(x_0, -Y) (y + Y) (x - x_0, y + Y) \frac{S_3(\beta \rho_1)}{\rho_1^3} dx_0 \\ & + \pi \int_{-X}^X I(x_0, Y) (y - Y) (x - x_0, y - Y) \frac{S_3(\beta \rho_2)}{\rho_2^3} dx_0 \quad (C.14) \\ & + \beta \pi \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \hat{I}(x^*, y^*) (x - x^*, y - y^*) \frac{S_2(\beta \rho^*)}{\rho^{*2}} dy^* dx^* \end{aligned}$$

A equação C.14, em linhas gerais, estaria pronta para ser aplicada a situação proposta. No entanto, inclusive como citado em Howell *et al.* (2011), pode-se observar que esta acarretaria problemas em sua resolução numérica quando o denominador – nomeadamente, as variáveis ρ_1 , ρ_2 e ρ^* – aproxima-se de zero, fazendo com que a expressão dentro da integral tenda ao infinito. Neste sentido, recorreu-se as transformações sugeridas por Yuen e Wong (1984) que mudam as coordenadas de cartesianas para cilíndricas e conseguem solucionar o problema numérico citado.

Por uma questão de compatibilidade e comparabilidade com o trabalho de Yuen e Wong (1984), primeiramente, adimensionaliza-se as equações através das relações

$$\eta = \frac{x}{X}, \quad (C.15)$$

¹Em inglês, *two-dimensional radiation function*.

$$\zeta = \frac{y}{Y}, \quad (\text{C.16})$$

$$L_1 = 2\beta X, \quad (\text{C.17})$$

$$L_2 = 2\beta Y \quad (\text{C.18})$$

e

$$d(\eta', \zeta') = \frac{1}{2} [L_1^2 (\eta - \eta')^2 + L_2^2 (\zeta - \zeta')^2] \quad (\text{C.19})$$

Obtendo, assim:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(\eta, \zeta) = & \frac{\pi L_1 L_2}{8} \int_{-1}^1 I(\eta_0, -1) (\zeta + 1) [L_1 (\eta - \eta_0), L_2 (\zeta + 1)] \dots \\ & \dots \frac{S_3 [d(\eta_0, -1)]}{d(\eta_0, -1)^3} d\eta_0 \\ & + \frac{\pi L_1 L_2}{8} \int_{-1}^1 I(\eta_0, 1) (\zeta - 1) [L_1 (\eta - \eta_0), L_2 (\zeta - 1)] \dots \\ & \dots \frac{S_3 [d(\eta_0, 1)]}{d(\eta_0, 1)^3} d\eta_0 \\ & + \frac{\pi L_1 L_2}{8} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \hat{I}(\eta^*, \zeta^*) [L_1 (\eta - \eta^*), L_2 (\zeta - \zeta^*)] \dots \\ & \dots \frac{S_2 [d(\eta^*, \zeta^*)]}{d(\eta^*, \zeta^*)^2} d\zeta^* d\eta^* \end{aligned} \quad (\text{C.20})$$

E, por fim, usam-se as seguintes transformações,

$$\eta = \eta' + \frac{2r}{L_1} \cos \phi \quad (\text{C.21})$$

$$\zeta = \zeta' + \frac{2r}{L_2} \sin \phi \quad (\text{C.22})$$

que, quando aplicadas a equação original, resultam em,

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_r(\eta, \zeta) = & \pi \int_{\phi_1}^{\phi_2} I(\eta_0, -1) [-\cos \phi, -\sin \phi] S_3 \left[\frac{L_2}{2} (\zeta + 1) \csc \phi \right] d\phi \\ & + \pi \int_{\phi_3}^{\phi_4} I(\eta_0, 1) [-\cos \phi, -\sin \phi] S_3 \left[\frac{L_2}{2} (\zeta - 1) \csc \phi \right] d\phi \\ & - \pi \int_{\phi} \int_r \hat{I}(r, \phi) [\cos \phi, \sin \phi] S_2 [r] dr d\phi \end{aligned} \quad (\text{C.23})$$

Finalmente, a equação C.23 pode ser aplicada para a resolução numérica do perfil térmico do coletor proposto sem que haja situações que apresentem singularidades. Todavia, deve-se tomar cuidado com os limites de integração das duas primeiras integrais – ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 – que são obtidos através da geometria do coletor solar, assim como o correto cálculo do raio na terceira integral, que é função do ângulo ϕ e limitado pela geometria do coletor.

Apêndice D – Dados de Entrada para o Ambiente Numérico

Este apêndice apresenta os dados de entrada utilizados nas simulações numéricas dentro deste trabalho. Estes dados dividem-se em três classes: geometria, onde especificam-se as dimensões e a disposição do coletor solar; propriedades dos materiais, que abrange as suas propriedades ópticas e termofísicas; e condições de operação, onde estão listadas as condições de contorno para a resolução do problema proposto.

D.1 Geometria

Tabela D.1: Dimensões do caso de referência.

Dimensão	Unidade	Valor
Altura do polímero semitransparente	mm	5
Altura do canal	mm	5
Largura do canal	mm	25
Altura do polímero opaco	mm	20
Largura dos polímeros	mm	30
Espessura das nervuras	mm	5
Comprimento do canal	m	1
Inclinação do coletor	°	45
Azimute do coletor	°	180
Altitude da localidade	m	50
Latitude da localidade	°	-27,3
Meridiano da localidade	°	-48,51

D.2 Propriedades dos materiais

A tabela D.2 resume as propriedades ópticas e termofísicas dos materiais utilizados nas simulações numéricas, assim como as suas fontes. As propriedades termofísicas da água e do ar – utilizadas para determinação dos coeficientes de convecção, por exemplo – são as listadas em Bejan (2004) e não serão reproduzidas neste apêndice.

D.3 Condições de operação

Para caracterizar o coletor solar duopolimérico em uma faixa abrangente de condições de operação, utilizou-se os valores listados na tabela D.3. Lembra-se que estas condições foram arbitradas baseadas nas restrições para teste de coletores solares em regime permanente.

Tabela D.2: Propriedades dos materiais utilizadas nas simulações numéricas.

Propriedade	Unidade	Material	Valor	Fonte
Condutividade térmica	[W/m.k]	Policarbonato	0,21	(GOODFELLOW, 2014)
		Polimetilmetacrilato	0,21	(GOODFELLOW, 2014)
		Polietileno	0,33	(GOODFELLOW, 2014)
		Polietileno UHMW	0,47	(GOODFELLOW, 2014)
Índice de refração	-	Policarbonato	1,585	(GOODFELLOW, 2014)
		Polimetilmetacrilato	1,490	(GOODFELLOW, 2014)
		Água	1,330	(TSILINGIRIS, 1997)
Coeficiente de absorção para radiação solar	1/m	Policarbonato	20	(O'BRIEN-BERNINI; MCGOWAN, 1984)
		Polimetilmetacrilato	8,8	(O'BRIEN-BERNINI; MCGOWAN, 1984)
Coeficiente de absorção para radiação térmica	1/m	Policarbonato	1200	(O'BRIEN-BERNINI; MCGOWAN, 1984)
		Polimetilmetacrilato	1200	(O'BRIEN-BERNINI; MCGOWAN, 1984)
Absortância em incidência normal	-	Polietileno		
		Polietileno UHMW	0,93	(HENNINGER, 1984)
Emitância hemisférica	-	Polietileno		
		Polietileno UHMW	0,93	(HENNINGER, 1984)

Tabela D.3: Dados de entrada para as simulações numéricas.

T_{agua}	T_{amb}	u_{vento}	\dot{m}	θ	G_b	G_d	G	f_{dif}	H	γ_s
$^{\circ}C$		m/s	kg/sm^2	$^{\circ}$	W/m^2			$\%$	-	$^{\circ}$
18,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
20	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
22,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
25	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
27,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
30	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
32,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
35	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
37,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
40	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
42,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
45	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
47,5	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
50	20	3	0,02	10	490	210	700	30	12	170
23	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
25	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
27,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
30	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
32,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
35	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
37,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
40	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
42,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
45	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170

Tabela D.4: Dados de entrada para as simulações numéricas. (continuação)

$T_{água}$	T_{amb}	u_{vento}	\dot{m}	θ	G_b	G_d	G	f_{dif}	H	γ_s
$^{\circ}C$		m/s	kg/s	$^{\circ}$	W/m^2			$\%$	-	$^{\circ}$
47,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
50	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
52,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
55	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
57,5	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
60	25	3	0,02	10	680	170	850	20	12	170
26	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
27,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
30	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
32,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
35	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
37,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
40	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
42,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
45	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
47,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
50	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
52,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
55	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
57,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
60	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
62,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
65	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
67,5	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170
70	30	3	0,02	10	900	100	1000	10	12	170

Apêndice E – Dados Qualificados para a Regressão

Os dados vindos diretamente do ensaio experimental (também chamados de dados crus ou brutos), devem passar, primeiramente, por um processo de validação, onde a consistência deste grupo de dados é conferida, e, após esta primeira triagem, os dados são submetidos a um processo de verificação de atendimento a certas exigências – o processo de tratamento, em si. Decorridas estas duas etapas, os dados remanescentes são os qualificados para participar do método de regressão.

Neste apêndice, os dados qualificados são apresentados de forma gráfica, a fim de visualizar as condições de operação as quais o coletor solar foi ensaiado e perceber, de forma geral, a abrangência destas condições.

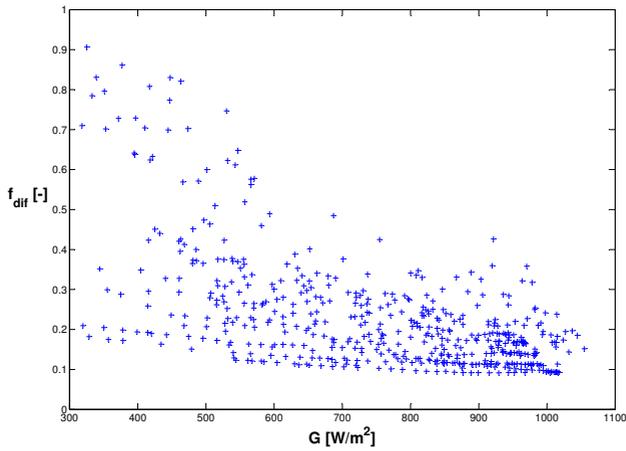


Figura E.1: Relação entre fração difusa e irradiância global.

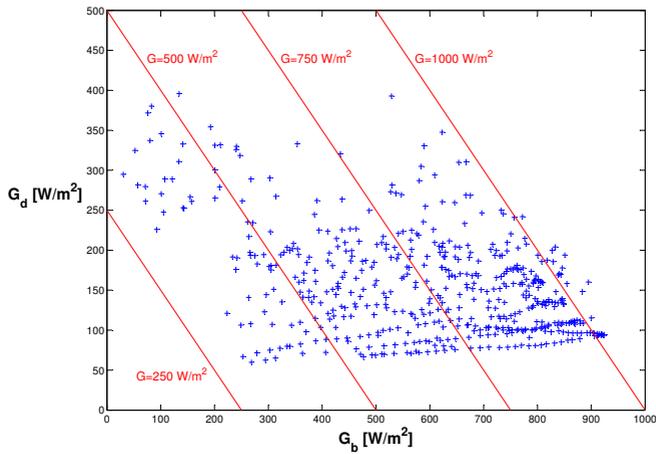


Figura E.2: Relação entre irradiância difusa e direta.

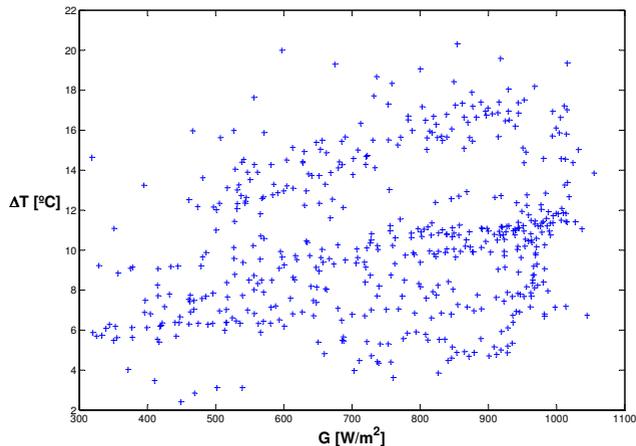


Figura E.3: Relação entre irradiância global e diferença de temperatura de saída e entrada da água.

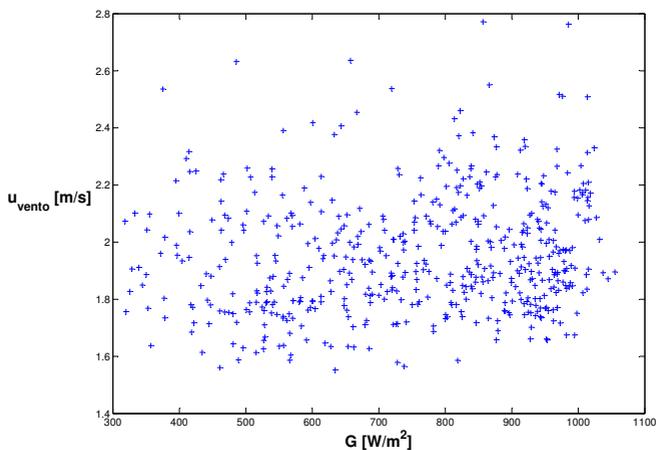


Figura E.4: Relação entre irradiância global e velocidade do vento.

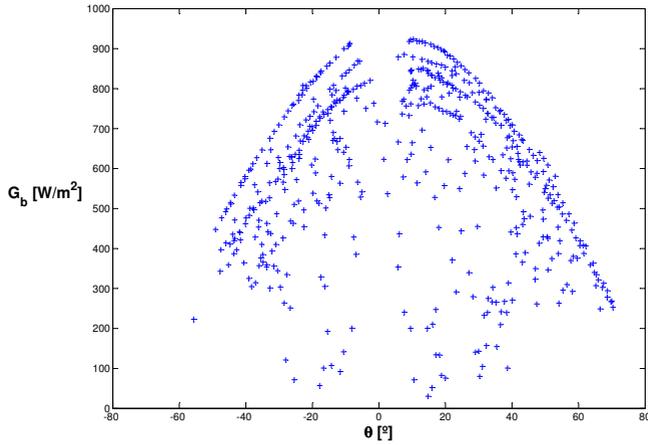


Figura E.5: Relação entre irradiância direta e ângulo de incidência.

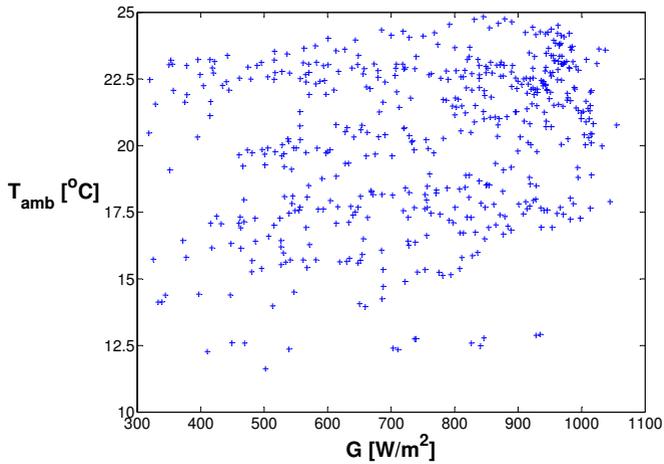


Figura E.6: Relação entre temperatura ambiente e irradiância global.

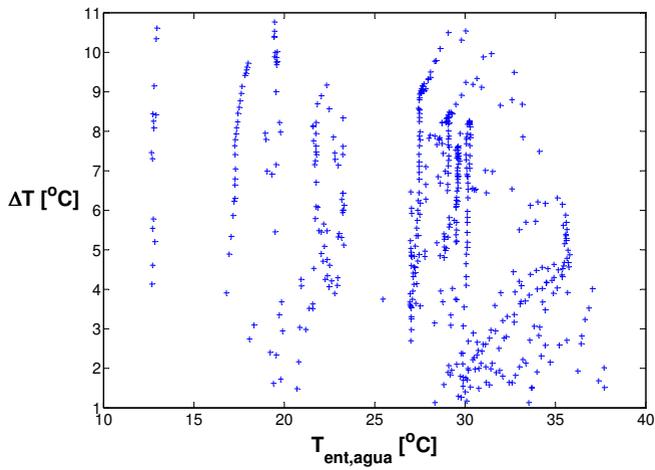


Figura E.7: Relação entre o ganho de temperatura da água e a temperatura da água na entrada do coletor.