

TÂNIA REGINA DE SOUZA

**“ PROPOSTA DE UM EVAPORADOR DE FILME DESCENDENTE COM
PROMOTOR DE PELÍCULA USANDO ENERGIA SOLAR ”**

**CONSULTA
FT-2379**

**São Paulo
2007**

OK

TÂNIA REGINA DE SOUZA

**“ PROPOSTA DE UM EVAPORADOR DE FILME DESCENDENTE COM
PROMOTOR DE PELÍCULA USANDO ENERGIA SOLAR ”**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof^ª. Dr^ª. Maria Elena Santos Taqueda

São Paulo

2007



Nº USP 3236461

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Relatório de Defesa

Relatório de defesa pública de Tese do(a) Senhor(a) Tânia Regina de Souza no Programa: Engenharia Química, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 8 dias do mês de maio de 2007, realizou-se a Defesa da Tese do(a) Senhor(a) Tânia Regina de Souza, apresentada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia - Área: Engenharia Química, intitulada:

Proposta de um evaporador de filme descendente com promotor de película usando energia solar

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

Nome dos Participantes da Banca	Vínculo do Docente	Sigla da Unidade	Resultado
Maria Elena Santos Taqueda	Presidente	EP - USP	APROVADA
Claudio Roberto de Freitas Pacheco	Titular	EP - USP	aprovada
Thereza Christina Vessoni Penna	Titular	FCF - USP	aprovada
Antonio Carlos Silva Costa Teixeira	Titular	EP - USP	aprovada
Leila Peres	Titular	UNICAMP - Externo	aprovada
Resultado Final: X Maria Elena			APROVADA
Parecer da Comissão Julgadora *			

Codpes/En
52822
PAI

Comentários da Defesa (opcional)

Eu, Elisabete Aparecida F da Silva Ramos, Técnico Acadêmico, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as), São Paulo, aos 8 dias do mês de maio de 2007.

Claudio Roberto de Freitas Pacheco

Thereza Christina Vessoni Penna

Antonio Carlos Silva Costa Teixeira

Leila Peres

Maria Elena Santos Taqueda
Orientador(a)

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório. Nos termos do artigo 110, do RG-USP, encaminhe-se o presente relatório à CPG, para homologação.

TÂNIA REGINA DE SOUZA

**“ PROPOSTA DE UM EVAPORADOR DE FILME DESCENDENTE COM
PROMOTOR DE PELÍCULA USANDO ENERGIA SOLAR ”**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof^ª. Dr^ª. Maria Elena Santos Taqueda

São Paulo

2007

SYSNO: 1600265

03/07/07.

DEDALUS - Acervo - EP-EPBC



31200022654



Escola Politécnica da USP
Divisão de Biblioteca

FT- 2349

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Tânia Regina de

Proposta de um evaporador de filme descendente com promotor de película usando energia solar / T.R. de Souza. – São Paulo, 2007.

186 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Evaporação 2.Filmes finos 3.Energia solar 4.Soluções - Concentração I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas me acompanharam durante esses anos que passei na elaboração deste trabalho, e falar de todas seria quase impossível. Algumas estiveram próximas, outras acompanharam um pouco mais distantes, mas todas me ajudaram a chegar até aqui e por isso gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos a:

A Deus, que me deu a vida, saúde, coragem, determinação para perseguir meus ideais e proteção em todos os instantes de minha vida.

A Prof^a. Dr^a. Maria Elena Santos Taqueda, por suas indicações, sugestões, críticas e pela atenção durante os anos de convivência, contribuindo para meu crescimento pessoal, científico e intelectual durante sua orientação, não só no doutorado, mas também no mestrado. Gostaria de expressar toda a minha gratidão pela sua amizade, dedicação, orientação e de todo tempo despendido a mim, pois mesmo com todas as atividades, problemas e responsabilidades, profissionais e pessoais, sempre estive à disposição para uma orientação clara, precisa e eficiente.

Ao Prof. Dr. Wilson Miguel Salvagnini, por suas valiosas sugestões, seu auxílio na parte experimental e excelentes idéias, contribuindo para a ampliação de meus conhecimentos na montagem do equipamento e solução de problemas.

A meu esposo Willian por todo carinho demonstrado em pequenos gestos, apoio, compreensão e presença sempre constante, me transmitindo total tranquilidade para me dedicar a este trabalho.

A minha mãe Marlene por não ter medido esforços para que eu alcançasse essa meta. Por todo seu incentivo a cada passo da minha vida pessoal e profissional. Seu apoio foi incansável e fundamental durante toda minha vida, principalmente no período de elaboração deste trabalho. Obrigada por todos os abraços e beijos que me renovaram a cada dia.

A meu pai Darbi (in memorian), pelos exemplos de vida que deixou e por tudo que me ensinou em vida. Sei que está muito orgulhoso de mim e espero que eu possa receber seu grandioso abraço quando nos reunirmos, para assim comemorarmos mais este título.

A minha sobrinha Laís que sempre se fez presente me demonstrando quanto é bom viver apesar dos obstáculos que a vida impõe.

Agradeço a toda minha família por todo amor e orgulho demonstrados ao decorrer de todos esses anos.

Aos amigos que sempre se mostraram presentes em momentos bons e ruins da minha vida, me ajudando e sempre me apoiando.

Aos professores que através de seus ensinamentos contribuíram para minha alfabetização, formação do primeiro e segundo grau e formação acadêmica.

Aos funcionários e professores do Departamento da Engenharia Química da Escola Politécnica da USP, sempre prestativos, demonstrando sua constante colaboração e amizade.

À Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão da bolsa de doutorado (processo de número 140575 / 2003 - 0) e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao IAG - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, por ter cedido os dados de radiação solar que utilizei.

E a todos que, esquecidos aqui, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho me apoiando e auxiliando nesta importante realização de minha vida.

OBRIGADA!!

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, 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

RESUMO

Após a reunião de Kioto ficou estabelecido o sistema de “crédito carbono” no qual as indústrias que reduzissem a emissão de gás carbônico para o ambiente aufeririam algumas vantagens. Neste sentido já há uma procura por parte de algumas empresas em reduzir esta emissão. Na maioria dos casos esta emissão é reduzida por meio da absorção do CO₂ através de uma base, por exemplo, soda, amônia, cal, aminas, entre outras. O caso da amônia e da soda é interessante para empresas que possuem outros efluentes com estas bases em concentrações bem baixas, resultando assim soluções bem diluídas dos sais correspondentes. Soluções muito diluídas ou são descartadas no meio ambiente, que atualmente é proibido, ou são concentradas. A concentração, dessas soluções, usando vapor como meio de aquecimento torna-se um contra-senso por exigir a emissão de CO₂ decorrente da queima de óleo combustível em caldeiras. Técnicas bem mais compatíveis com a preservação ambiental serão bem vindas daqui por diante, principalmente aquelas que não emitem CO₂. Observando este fato este trabalho visa desenvolver um evaporador com promotor de película, em escala de laboratório para concentrar soluções diluídas, empregando energia solar como meio de aquecimento. O procedimento proposto não emite CO₂, sendo mais compatível com a preservação ambiental. O equipamento construído consta de: coletor solar tipo placa plana com inclinação ajustável, promotor de película (aderido ao coletor), distribuidor de líquido, coletor de concentrado e acessórios. Foram estudadas as influências das variáveis: inclinação do coletor, vazão de alimentação e condições meteorológicas, na taxa de evaporação. As condições meteorológicas não podem ser controladas, mas foram constantemente monitoradas. Obtiveram-se maiores eficiências, quando a inclinação do coletor foi ajustada mensalmente, com valores até 36,4% maiores do que quando o coletor permanece fixo.

Palavras-chave: evaporação solar. evaporação em filme descendente. promotor de película. superfície estruturada. energia solar.

ABSTRACT

The system of Carbon Credits established by the 1997 Kyoto Protocol benefits companies that reduce their emissions of carbon into the environment with some advantages. Since the Protocol was signed, many companies have sought new ways to reduce their emissions. In most cases, these emissions are reduced through CO₂ absorption by a base, e.g., soda, ammonia, lime and amines, among others. Ammonia and soda are interesting bases for companies that produce other effluents containing these products in much lower concentrations, resulting in highly diluted solutions of the corresponding salts. Highly diluted solutions are either discharged into the environment, which is forbidden today, or they are concentrated. Concentrating these solutions using vapour, as a means of heating is unfeasible since that would involve the emission of CO₂ from burning oil in boilers. Therefore, from now on, attention will focus increasingly on more environmentally friendly techniques, especially techniques that do not cause CO₂ emissions. A solar energy powered falling film evaporator with film promoter was developed for concentrating diluted solutions (industrial effluents). The procedure proposed here does not emit CO₂, making it a viable alternative to the method of concentrating solutions. This novel device consists of the following components: a flat plate solar collector with adjustable inclination, a film promoter (adhering to the collector), a liquid distributor, a concentrate collector, and accessories. The evaporation rate of the device was found to be affected both by the inclination of the collector and by the feed flow. The meteorological variables cannot be controlled, but were monitored constantly to ascertain the behavior of the equipment in response to the variations occurring throughout the day. Higher efficiencies were attained when the inclination of the collector was adjusted monthly, showing up to 36.4% higher values than when the collector remained in a fixed position.

Keywords: solar evaporation. falling film evaporation. film promoter. structured surface. solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
2.1	Esquema de um evaporador solar	15
2.2	Varição da espessura de película com a placa plana em diferentes inclinações	18
2.3	Comparação das taxas de evaporação do evaporador e do dessalinizador solar	20
2.4	Fluxo de massa na superfície livre exposta ao ar	21
2.5	Esquema de um dessalinizador solar convencional	22
2.6	Efeito estufa em um dessalinizador	23
2.7	Porcentagem da radiação solar absorvida e refletida	28
2.8	Ocorrência das estações do ano no hemisfério sul	30
2.9	Ângulo de declinação solar	31
2.10	Espectro de radiação eletromagnética	34
2.11	Mapas de incidência da média da radiação solar global no Brasil, no ano 2000	36
2.12	Valores de H_p para diferentes valores de inclinação	43
2.13	Representação de um coletor solar plano básico	46
2.14	Funcionamento de um sistema tipo disco	49
2.15	Vista frontal e posterior de um coletor solar tipo disco	49
2.16	Funcionamento de um sistema cilíndrico parabólico	50
2.17	Foto de um sistema cilíndrico parabólico de Almeria	50
2.18	Funcionamento de um sistema de torre solar	51
2.19	Foto de um heliostato pertencente ao sistema de torre solar de Almeria	51
2.20	Vista aérea de um sistema de torre solar em Almeria	52
2.21	Esquema do sistema físico	54
2.22	Volume de controle infinitesimal (dx, dy, l) do fluxo de massa na camada limite cinética bidimensional	55

ERRATA

Pág.	ONDE SE LÊ	LEIA-SE	
8	... E em 1862, o químico francês E em 1782, o químico francês ...
62	$\rho \cdot \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g \cdot \rho \cdot \text{sen } \beta \quad (2.32)$		$\rho \cdot \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g \cdot \rho \cdot \text{sen } \beta + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.32)$
67	$\rho_g = \rho_{ar} + \rho_v = \rho_g \cdot m_{ar} + \rho_g \cdot m_v = \rho_g (m_{ar} + m_v) \quad (2.43)$		$\rho_g = \rho_g \cdot m_{ar} + \rho_g \cdot m_v = \rho_g (m_{ar} + m_v) \quad (2.43)$
72	$q_c = 39.183 \times 10^{-1} V^{0.5} (t_a - t_\infty) \quad (2.62)$		$q_c = 39.183 \times 10^{-2} V^{0.5} (t_a - t_\infty) \quad (2.62)$
86	... E a porcentagem de água evaporada E a porcentagem de água evaporada (% Evap)
90	... obtidos com um anemômetro obtidos, na cidade de São Paulo, com um anemômetro ...
95	... com 6 pontos centrais com 6 repetições do ponto central ...

Prof. Dr. Rogério de Sá

2.23	Volume de controle infinitesimal ($dx, dy, 1$) das tensões viscosas normais e de cisalhamento na camada limite cinética bidimensional	57
2.24	Volume de controle infinitesimal ($dx, dy, 1$) do fluxo de momentum na camada limite cinética bidimensional	58
2.25	Volume de controle infinitesimal ($dx, dy, 1$) da conservação da energia na camada limite térmica bidimensional	61
2.26	Volume de controle infinitesimal ($dx, dy, 1$) da conservação da massa na camada gasosa	63
2.27	Volume de controle infinitesimal ($dx, dy, 1$) para a conservação da energia na camada gasosa	66
2.28	Esquema do balanço de energia para um evaporador solar	71
2.29	Esquema do balanço de energia para um dessalinizador solar	74
3.1	Esquema do equipamento	78
3.2	Foto do equipamento	78
3.3	Esquema do equipamento com pré-aquecimento	79
3.4	Foto do equipamento com pré-aquecimento	79
3.5	Foto da bomba peristáltica	80
3.6	Foto do distribuidor de líquidos	80
3.7	Foto do coletor de concentrado	81
3.8	Esquema da placa plana com o promotor de película aderido	82
3.9	Foto da placa plana no início de um dos experimentos	83
3.10	Foto da placa plana após a molhabilidade mecânica	83
3.11	Foto do higrômetro	84
3.12	Foto do piranômetro do tipo Eppley-PBW nas instalações do IAG	92
3.13	Foto do piranômetro do tipo Eppley-PSP nas instalações do IAG	93
3.14	Média mensal da radiação solar global incidente sobre a cidade de São Paulo	94
4.1	Irradiância solar e energia acumulada nos dias em que foram realizados os experimentos planejados	100

4.2	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos nos meses de outubro a fevereiro	111
4.3	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de março	112
4.4	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de abril	113
4.5	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de maio	113
4.6	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos nos meses de junho e julho	114
4.7	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de agosto	115
4.8	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de setembro	116
4.9	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o período de outubro a fevereiro	130
4.10	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de março	130
4.11	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de abril	131
4.12	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de maio	131
4.13	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para junho e julho	131
4.14	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de agosto	132
4.15	Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de setembro	132
4.16	Efeito da inclinação da placa na %Evap nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro	133

4.17	Irradiância solar e energia acumulada, no dia 12/01/06	134
4.18	Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de março	135
4.19	Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de abril	135
4.20	Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de maio	136
4.21	Efeito da inclinação da placa na %Evap nos meses de junho e julho	137
4.22	Efeito da inclinação da placa na %Evap nos mês de agosto	138
4.23	Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de setembro	138
4.24	Resultados obtidos no mês de maio, com pré-aquecimento da alimentação	140
4.25	Resultados obtidos no mês de maio com e sem pré-aquecimento da alimentação	140
4.26	Resultados obtidos em agosto, com e sem pré-aquecimento da alimentação	140
4.27	Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos com pré-aquecimento da alimentação	141
4.28	Valores de %Evap de uma solução de NaCl com 5% em massa, obtidos com inclinação de 46,75° e vazão de 2,5 g/s	142
4.29	Irradiância solar e energia acumulada, no dia 19/06/06	142
4.30	Comparação dos valores de %Evap da água com e sem pré-aquecimento e de uma solução salina de NaCl com 5% em massa, pré-aquecida	144
4.31	Transporte de calor x tempo, para o mês de julho	145
4.32	Transporte de calor x tempo, para o mês de julho, Sartori (1996)	145
4.33	Transporte de calor x tempo, para o mês de dezembro	147
4.34	Evaporação x tempo	148
4.35	Evaporação x tempo (SARTORI, 1996)	148
4.38	Evaporação x tempo (SRITHAR; MANI, 2003)	149

LISTA DE TABELAS

Tabela	Título	Pág.
2.1 -	Distribuição das fontes energéticas no Brasil	10
2.2 -	Índices de refletividade para diferentes tipos de solo	39
2.3 -	Melhor inclinação para cada mês do ano	43
2.4 -	Dados para escolha do coletor solar adequado ao projeto	44
2.5 -	Desenvolvimento tecnológico dos diferentes tipos de coletores solares	53
3.1 -	Codificação das variáveis originais	89
4.1 -	Planejamento experimental e resultados obtidos	101
4.2 -	Estimativa dos efeitos e dos coeficientes	103
4.3 -	Análise da variância da regressão	104
4.4 -	Irradiância global incidente na placa inclinada para diferentes inclinações	107
4.5 -	Inclinações do coletor na cidade de São Paulo e inclinações obtidas por outros autores em outras localidades	108
4.6 -	Energias direta e difusa acumuladas para todo o ano, nos períodos empregados para os testes utilizando o <i>procedimento 1</i>	116
4.7 -	Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 3,25° e diferentes vazões), nos meses de outubro a fevereiro	118
4.8 -	Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 15° e diferentes vazões), no mês de março	120
4.9 -	Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 31,5° e diferentes vazões), no mês de abril	122
4.10 -	Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 42° e diferentes vazões), no mês de maio	123
4.11 -	Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 46,75°	124

e diferentes vazões), nos meses de junho e julho	
4.12 - Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 36,5° e diferentes vazões), no mês de agosto	126
4.13 - Resultados experimentais obtidos com o <i>procedimento 1</i> (inclinação de 20° e diferentes vazões), no mês de setembro	128
4.14 - Modelos de regressão para os períodos estudados com os respectivos parâmetros de ajuste	129
4.15 Concentração final da solução salina ao longo de um experimento	143

LISTA DE SÍMBOLOS

	Grandeza	Unidade
Re	Número de Reynolds	-----
Γ	Vazão de líquido por perímetro	kg/s.m
μ	Viscosidade dinâmica do líquido	kg/s.m
T_a	Temperatura da água	K
T_o	Temperatura de orvalho do ar ambiente	K
T_∞	Temperatura ambiente	K
T_{vv}	Temperatura da superfície do vidro	K
G_{SC}	Constante solar ($G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$)	W/m^2
ϕ	Latitude	°
δ	Declinação solar	°
n	Número correspondente ao dia do ano	-----
H_β	Média mensal da irradiância global diária sobre um plano inclinado	$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$
H	Média mensal da irradiância global diária sobre um plano horizontal	$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$
H_d	Média mensal da irradiância difusa diária sobre um plano horizontal	$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$
R_b	Quociente entre H_β e H	-----
β	Inclinação do coletor solar	°
Ω	Índice de refletividade do solo	-----
w_s	Ângulo horário do nascer do Sol na superfície inclinada	°
w_o	Ângulo horário do nascer do Sol na superfície horizontal	°
A_t	Índice de anisotropia	-----
H_b	Média mensal da irradiância direta diária sobre um plano horizontal	$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$
H_o	Média mensal da radiação extraterrestre diária sobre um plano perpendicular ao feixe de radiação solar	$\text{kWh/m}^2.\text{dia}$
f	Função de modulação	-----
ρ	Massa específica do líquido	kg/m^3
u	Componente da velocidade mássica do líquido na direção x	m/s
v	Componente da velocidade mássica do líquido na direção y	m/s

X	Componentes da força volumar por unidade de volume do fluido na direção x	N/m ³
Y	Componentes da força volumar por unidade de volume do fluido na direção y	N/m ³
F _s	Forças superficiais	N/m ²
σ _{ij}	Tensão superficial normal a superfície i, na direção j	N/m ²
τ _{ij}	Tensão de cisalhamento normal a superfície i, na direção j	N/m ²
F _{s,x}	Força superficial na direção x	N/m ²
P _∞	Pressão atmosférica	Pa
F _{s,y}	Força superficial na direção y	N/m ²
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
ν	Viscosidade cinemática do líquido	m ² /s
ε _m	Difusividade da água para o momentum	m ² /s
e	Energia interna térmica, por unidade de massa	J/kg
E _c	Energia cinética	W
Ė _g	Energia gerada	W
Ẇ	Taxa de trabalho	W
k	Condutibilidade térmica molecular do líquido	W/m.K
T	Temperatura do líquido	K
Φ	Função de dissipação viscosa	s ⁻²
q̇	Taxa de geração de energia por unidade de volume	W/m ³
c _p	Calor específico do líquido	J/kg.K
Pr	Número de Prandtl	-----
Pr _t	Número de Prandtl do filme de água turbulento	-----
H ⁺	Fluxo de radiação em direção a interface líquido-gás	W/m ²
H ⁻	Fluxo de radiação em direção da superfície da placa plana	W/m ²
ρ _g	Massa específica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água	kg/m ³
u _g	Componente da velocidade mássica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água na direção x	m/s

V_g	Componente da velocidade mássica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água na direção y	m/s
μ_g	Viscosidade dinâmica da mistura gasosa	kg/m.s
ρ_∞	Massa específica do vapor presente na atmosfera	kg/m ³
e_g	Energia interna da mistura gasosa, por unidade de massa	J/kg
k_g	Condutibilidade térmica molecular da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água	W/m.K
T_g	Temperatura da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água	K
D	Coefficiente de difusão	m ² /s
$c_{p,g}$	Calor específico para uma mistura de gás binária	J/kg.K
$c_{p,v}$	Calor específico para o vapor d'água presente em uma mistura de gás binária	J/kg.K
$c_{p,ar}$	Calor específico para o ar seco presente em uma mistura de gás binária	J/kg.K
ρ_{ar}	Massa específica do ar seco presente em uma mistura de gás binária	kg/m ³
ρ_v	Massa específica do vapor d'água presente em uma mistura de gás binária	kg/m ³
m_{ar}	Fração mássica do vapor d'água presente em uma mistura de gás binária ...	-----
m_v	Fração mássica do ar seco presente em uma mistura de gás binária	-----
T_e	Temperatura de entrada	K
u_∞	Velocidade da atmosfera na direção x	m/s
$m_{v\infty}$	Fração mássica do vapor d'água presente na atmosfera	-----
λ_c	Comprimento de onda acima do qual a água é opaca	μm
α_λ	Absortividade da superfície para o comprimento de onda λ	-----
H_λ^+	Fluxo de radiação no início da placa plana com o comprimento de onda λ ..	W/m ²
u_i	Velocidade da interface gás/água, na direção x	m/s
T_i	Temperatura da interface gás/água	K
m_i	Fluxo de massa interfacial	kg/sm ²
$\rho_{i,g}$	Massa específica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água na interface gás/água	kg/m ³
v_i	Velocidade da interface gás/água, na direção y (m/s)	m/s

m_i	Fração mássica do vapor d'água na interface	-----
$p_{i,v}$	Pressão de saturação na interface gás-água	Pa
M_a	Massa molar do ar seco	-----
M_v	Massa molar do vapor	-----
α_a	Absortância solar da água	-----
q_r	Taxa de transporte de calor por radiação	W/m ²
q_c	Taxa de transporte de calor por convecção	W/m ²
q_k	Taxa de transporte de calor por condução	W/m ²
q_e	Taxa de transporte de calor por evaporação	W/m ²
C_{ev}	Capacidade térmica do evaporador	kJ/m ² K
θ	Tempo	h
H_{abs}	irradiância absorvida pelo líquido	kWh/m ² .dia
ϵ_a	Emitância da água	-----
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,6697 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)	W/m ² K ⁴
t_a	Temperatura da água	°C
t_{sky}	Temperatura do espaço	°C
V	Velocidade do vento	m/s
t_∞	Temperatura atmosférica	°C
p_a	Pressão de vapor de água na temperatura da água	Pa
p_o	Pressão de vapor de água na temperatura de orvalho do ar	Pa
h_w	Calor latente de vaporização da água	kJ/kg
t_o	Temperatura de orvalho do ar ambiente	°C
\dot{m}	Taxa de evaporação	kg/s
α_{vv}	Absortância solar do vidro	-----
τ_{vv}	Transmitância do vidro	-----
q_d	Dissipação de calor do vidro para a vizinhança	W/m ²
A	Área do coletor solar	m ²
C_{st}	Capacidade térmica do dessalinizador	kJ/m ² K
t_{vv}	Temperatura do vidro	°C

p_{vv}	Pressão de vapor de água na temperatura do vidro	Pa
ϵ_v	Emitância do vidro	-----
h_{va}	Coefficiente de transferência de calor do vidro para o ar	W/m ² .K
η_c	Eficiência que leva em conta que nem toda água condensada é coletada	-----
W_{ae}	Taxa de água evaporada	g/s
W_i	Vazão mássica do líquido na entrada da placa	g/s
W_f	Vazão mássica do líquido na saída da placa	g/s
%AE	Porcentagem de água evaporada	%
C_{is}	Concentração inicial da solução	% em massa
W_{se}	Vazão mássica da solução na entrada da placa plana	g/s
C_{fs}	Concentração final da solução	% em massa
W_{sf}	Vazão mássica da solução na saída da placa plana	g/s

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Objetivo	04
1.2. Escopo da tese	05
2. REVISÃO DA LITERATURA	07
2.1. O uso da energia solar	07
2.2. Evaporação empregando energia solar como meio de aquecimento	13
2.2.1. Emprego da energia solar na concentração de soluções	15
2.2.2. Emprego da energia solar na dessalinização de soluções	22
2.3. A radiação solar	27
2.3.1. Incidência da radiação solar em superfícies inclinadas	37
2.3.2. Posição do coletor solar para maximizar a absorção de radiação solar	42
2.4. O coletor solar	44
2.4.1. Coletor solar plano	45
2.4.2. Coletor solar de foco ou coletor com concentração de energia	48
2.5. Transporte de momentum, calor e massa em coletores solares	53
2.5.1. Transporte de calor e massa em concentradores e dessalinizadores solares	70
3. MATERIAIS E MÉTODOS	77
3.1. Descrição do equipamento utilizado neste estudo	77
3.2. Metodologia experimental	83
3.2.1. Utilização da água como fluido de processo	85
3.2.2. Utilização de uma solução salina como fluido de processo	85
3.2.3. Procedimento para a realização dos experimentos	86

3.3. Ensaio preliminares	87
3.4. Planejamento experimental	88
3.5. Procedimentos experimentais	90
3.6. Transporte de calor e de massa	90
3.7. Metodologia de interpretação dos resultados	91
3.8. Tratamento dos dados de radiação solar	92
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1. Resultados dos testes preliminares	95
4.2. Resultados dos planejamentos experimentais	97
4.3. Resultados dos cálculos da irradiância solar em superfícies inclinadas	106
4.3.1. Comparação de inclinações do coletor em São Paulo com inclinações de coletores em outras localidades	108
4.4. Resultados experimentais	109
4.4.1. Resultados experimentais, seguindo o <i>procedimento 1</i>	109
4.4.2. Resultados experimentais, seguindo o <i>procedimento 2</i>	133
4.4.3. Resultados experimentais com pré-aquecimento da alimentação	139
4.4.4. Resultados experimentais da evaporação da solução de NaCl (5% em massa) com o pré-aquecimento da alimentação	141
4.4.5. Comparação dos resultados experimentais de %Evap da solução de NaCl (5% em massa) com resultados de %Evap da água	143
4.5. Resultados do transporte de calor e de massa de evaporadores solares	144
4.5.1. Comparação de valores de transporte de calor e massa obtidos neste trabalho com valores de Sartori (1996)	145
4.5.2. Comparação de valores de transporte de calor e massa obtidos neste trabalho com valores obtidos por Srithar e Mani (2003)	149
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	151

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXOS	162

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Em 1973 houve uma crise, no setor petrolífero, elevando bruscamente o preço do petróleo e contribuindo para que o mundo notasse que as jazidas de combustíveis fósseis se tornavam cada vez mais escassas e que fontes energéticas alternativas deveriam ser consideradas como substituintes do combustível, em diversos processos industriais (ROSA, 2003; BAHIA, 2004).

Nos meados dos anos 80, o petróleo estabilizou o preço e a preocupação com relação à escassez de combustível diminuiu acentuadamente. Entretanto, no final da década de 80 surgiu a preocupação com a variação climática, devido à queima de combustíveis fósseis. Esse fato fez renascer a necessidade da conscientização das pessoas em usar a energia elétrica de maneira mais eficiente e substituir combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, sempre que possível (BAHIA, 2004).

Os cientistas prevêem que em 40 anos as reservas de óleo combustível não atendam mais as taxas de consumo e que as reservas de gás não atendam mais a demanda em 60 anos (KALOGIROU, 2004). Como há um crescimento acentuado do consumo de energia elétrica e sua interrupção é impossível, está previsto para breve um colapso no setor energético. Este colapso é agravado pelo crescimento da população e conseqüente aumento do consumo de energia elétrica, acompanhado da falta de investimentos. Este fato foi comprovado no Brasil no ano de 2001 quando ocorreu um blecaute (“apagão”) e deixou uma grande parte do país sem energia elétrica, ocasionando um transtorno à população e as indústrias, acarretando em medidas de racionamento de energia (ROSA, 2003).

A construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) foi vista como solução do problema, mas apesar da hidroeletricidade ser considerada uma fonte de energia renovável, a construção

de usinas é onerosa, demorada e acarreta impactos ao meio ambiente. Dentre os impactos ambientais ocasionados destacam-se: o alagamento de grandes áreas matando as espécies da fauna e flora, além de expulsar todas as pessoas que residiam nestas áreas.

Uma outra solução seria a obtenção de energia a partir das usinas nucleares, mas a construção de tais usinas expõe toda a população a riscos de graves acidentes e ao eterno problema de destinação final do lixo radioativo.

Embora o planeta ainda disponha de reservas de combustível para os próximos anos, seu preço tem se elevado e esse passou a ser o centro das preocupações e disputas em todo o mundo. O petróleo passou a ser alvo de guerras, principalmente no Oriente Médio que detém as maiores reservas.

Nessa disputa mundial, o Brasil dispõe de uma posição favorável, pois desde a década de 70 o país dispõe da tecnologia de um combustível alternativo - o álcool (INPI, 2006) e a partir de 2006 passou a ser auto-suficiente na produção de petróleo com uma produção de 1,91 milhões barris/dia, produzindo uma quantidade maior do que o país consome. Essa auto-suficiência pode ser garantida por até 10 anos só com as bacias petrolíferas que são exploradas atualmente (PETROBRÁS, 2006).

O álcool combustível é considerado um biocombustível, por ser extraído de uma substância vegetal: a cana-de-açúcar. Atualmente, é usado de três maneiras diferentes: misturado com a gasolina (23% álcool e 77% gasolina), como álcool combustível e em veículos bi-combustível que utilizam tanto o álcool como a gasolina (PETROBRÁS, 2006).

Outro biocombustível que atualmente está em evidência, é o biodiesel, que é fabricado a partir de óleos vegetais, apresentando a vantagem de emitir menos poluentes que o óleo diesel (redução de 78% das emissões de CO₂, diminuição das emissões de CO e eliminação das

emissões de enxofre). Entretanto, seu custo é de 1,5 a 3 vezes superior ao do óleo diesel, o que o torna não competitivo (BIODIESELBR, 2007).

O gás natural veicular (GNV) também é utilizado no Brasil como combustível, tanto em indústrias como em veículos automotores. Mesmo sendo um combustível de origem fóssil, o GNV apresenta vantagens econômicas e ambientais quando comparado com outros combustíveis fósseis (PETROBRÁS, 2006).

Outras alternativas de obtenção de energia mais razoáveis do ponto de vista ambiental e até agora pouco utilizadas (solar, hidráulica e eólica), passam a ser vistas como prováveis soluções do colapso energético. Processos industriais que as utilizem como substituintes parciais ou totais dos combustíveis fósseis são essenciais e apresentam inúmeras vantagens quando comparados com sistemas que utilizam exclusivamente combustíveis fósseis.

O uso da energia solar se mostra eficaz em indústrias que apresentam alto consumo de energia em diversas etapas do processo produtivo, tais como: evaporação, secagem, cozimento, limpeza, extração e dessalinização (KALOGIROU, 2003; BUDIN; MIHELIC-BOGDANIC; FILIPAN, 1998; DUFFIE; BECKMAN, 1980). Porém, aspectos técnicos e econômicos muitas vezes inviabilizam suas utilizações, principalmente por necessitar de alto investimento inicial e grandes áreas para a instalação dos coletores solares.

Atualmente, o uso de energia solar no Brasil é pouco significativo, se restringindo ao aquecimento de água (em residências, hotéis, hospitais, vestiários, restaurantes e indústrias), a obtenção de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos e a produção de água potável a partir da dessalinização de água salobra, nas casas de consumidores que moram em áreas distantes das redes convencionais de abastecimento de água.

Para que o equipamento seja utilizado como dessalinizador solar, coloca-se uma superfície de vidro sobre o coletor solar. A água evaporada condensa sobre a superfície interna do vidro e escoar, para ser armazenada e utilizada como água potável. Em algumas regiões distantes ou em zonas áridas este procedimento pode ser a única alternativa de obtenção de água potável, geralmente a partir de águas subterrâneas (MACEDO, 1996; HONGFEI, 2001; BOUCHEKIMA et al., 2001; KUNZE, 2001).

A dessalinização solar poderia ser amplamente aplicada no território brasileiro, principalmente em zonas semi-áridas, localizadas no nordeste do Brasil. Nessas regiões a escassez de água potável é grande e a taxa de radiação solar incidente é praticamente a mesma ao longo de todo o ano, apresentando valores elevados.

Um problema encontrado por muitas empresas é que por questões ambientais não podem mais liberar no ambiente as soluções diluídas provenientes do processo industrial. Uma alternativa viável seria a concentração dessas soluções. O uso de vapor como meio de aquecimento emite CO_2 , proveniente da queima de óleo combustível em caldeira, contradizendo o sistema de crédito carbono, estabelecido na reunião de Kyoto (GREENPEACE, 2007). O procedimento experimental proposto neste trabalho vem colaborar na solução desse problema, propondo um método de concentrar tais soluções, utilizando energia solar como meio de aquecimento. Esse método não emite CO_2 e apresenta resultados promissores.

1.1 Objetivo

Observando essa tendência, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um evaporador de filme descendente com promotor de película, em escala de laboratório, empregando energia

solar para evaporação, contribuindo para a obtenção de um procedimento ecologicamente correto de concentrar soluções diluídas provenientes de processos industriais.

Para atingir o objetivo geral proposto, foi desenvolvido e construído um equipamento com os seguintes constituintes: coletor solar tipo placa plana com inclinação ajustável, promotor de película (aderido ao coletor), distribuidor de líquido, coletor de concentrado e acessórios.

1.2 Escopo da tese

Nessa tese, além do capítulo introdutório são apresentados mais 06 capítulos.

O capítulo 2 apresenta um levantamento bibliográfico, visando à aquisição e a ampliação de conhecimentos teóricos necessários à realização da pesquisa. Inicialmente, é apresentada a evolução do uso da energia solar desde a antiguidade até os dias de hoje. A seguir são abordadas as características da incidência da radiação solar e a importância do ajuste mensal da placa plana, na concentração solar de substâncias diluídas. E por fim, foi apresentado o equacionamento do transporte de momentum, de calor e de massa para o escoamento de um líquido sobre a superfície de coletores solares de placa plana, expostos ou não a radiação solar.

No capítulo 3, são apresentados: a descrição detalhada do equipamento utilizado, o procedimento que deve ser seguido para a realização dos experimentos com e sem pré-aquecimento da alimentação, a metodologia de análise dos resultados e o método para o tratamento de dados de radiação solar provenientes do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP).

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados experimentais obtidos neste trabalho e realiza uma comparação dos valores desses resultados com valores obtidos por outros autores, no que diz respeito a transporte de calor e massa.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, obtidas com base na discussão dos resultados.

O capítulo 6 mostra a relação das obras consultadas e citadas no texto, utilizadas como embasamento neste trabalho, de maneira que permita a identificação individual dos documentos. As referências estão organizadas em ordem alfabética e são redigidas pelas regras impostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Finalmente, no capítulo 7 são apresentados os anexos, que complementam o texto.

CAPÍTULO 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo foi apresentado um levantamento bibliográfico, visando à aquisição e a ampliação de conhecimentos teóricos, básicos e necessários à realização da pesquisa, assim como o conhecimento de equipamentos e processos, que utilizem a energia solar como meio de aquecimento, desenvolvidos na atualidade em diversos países. Na primeira fase do levantamento bibliográfico enfocou-se o uso da energia solar e sua evolução através dos anos, evidenciando suas vantagens e seu emprego como meio de aquecimento em concentração de soluções (objetivo deste trabalho) e em dessalinização de soluções. Posteriormente, referiram-se as características que influenciam a incidência da radiação solar no decorrer do ano, destacando-se a importância do ajuste da placa plana mensalmente para maximizar a absorção da radiação solar. E por fim, foi apresentado o equacionamento do transporte de momentum, de calor e de massa para o escoamento de um líquido sobre a superfície de coletores solares de placa plana, expostos ou não a radiação solar.

2.1 O uso da energia solar

Muitos povos da antiguidade veneravam o Sol como o próprio Deus. Na China antiga, os imperadores eram considerados “Filhos do Sol”, enquanto que no Egito o Sol era idolatrado e chamado de Amon-Rá (o Deus-Sol). Para os gregos e romanos, o Sol foi primeiro Hélios (Deus que dirigia um cavalo de fogo) e depois Apolo (Deus da luz, das profecias, da música, da poesia e de vários outros atributos considerados importantes para a época). O povo inca

venerava o Sol de tal maneira, que frequentemente ofereciam sacrifícios de seres humanos e animais para agradar e acalmar o Deus (BAHIA, 2004).

Além de idolatrar o Sol como um Deus, esses povos já conheciam e utilizavam os benefícios provenientes da energia solar, principalmente para obter fogo e realizar a secagem de peles e alimentos. Na Grécia antiga, a energia solar era utilizada juntamente com conhecimentos de arquitetura, visando melhorar o aquecimento das residências e assim economizar lenha e carvão (KALOGIROU, 2004; BAHIA, 2004).

Diz à lenda que no ano de 212 a.C. Arquimedes projetou o primeiro sistema solar, com utilidade bélica, que se tem notícia em toda a história da humanidade e conseguiu salvar a cidade de Siracusa do ataque marítimo dos romanos. Durante a batalha, Arquimedes utilizou um conjunto de espelhos planos e direcionou os raios solares contra as velas dos navios inimigos, que incendiaram, acarretando sua derrota. Esse sistema ficou conhecido como “Espelhos de Arquimedes” (PRADO, 1980; BAHIA, 2004).

O surgimento do primeiro coletor solar, relativamente similar aos aquecedores atuais, foi no ano de 1767, quando o suíço Horácio de Saussure atingiu temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água (KALOGIROU, 2004).

Em 1774 Antoine Laurent Lavoisier, famoso químico francês, construiu o primeiro forno solar e conseguiu atingir temperaturas da ordem de 2023 K. Nesta ocasião, realizou a conhecida experiência em que queimou diamante e obteve dióxido de carbono, demonstrando assim que o diamante é uma variedade cristalina e puríssima do carbono (MOMOI, 2005).

Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico do selênio, em 1839 e desenvolveu um mecanismo para transformar a energia solar diretamente em eletricidade. E em 1862, o químico francês

Lavoisier usou grandes lentes montadas sobre estruturas metálicas para concentrar os raios solares e produzir vapor (KALOGIROU, 2004).

Entre os anos de 1864 e 1878 o francês Augusto Mouchot desenvolveu vários sistemas motores que funcionavam a vapor, produzido somente com a energia solar. Encorajado pelo sucesso de sua descoberta fundou a primeira indústria solar que se têm notícias, denominada “Centrale des Utilizateurs de la Chaleur Solaire” (BAHIA, 2004).

Em 1874 foi construído o primeiro equipamento de destilação solar a partir de águas subterrâneas, utilizando para isso coletores solares com uma área total de 4700 m². Este sistema esteve em funcionamento em uma mina de extração de nitrato, por 40 anos no Chile e produzia 23000 litros de água potável por dia (4,9 L/m²) (KALOGIROU, 2004; PALZ, 1981).

Há o registro de outras plantas de destilação solar construídas entre os anos de 1965 e 1970 nas Ilhas Gregas, para suprir a necessidade de água potável das pequenas comunidades existentes nestas Ilhas (KALOGIROU, 2005).

A indústria solar começou a se expandir por volta de 1920, alcançando seu auge nas vésperas da II Guerra Mundial. Depois da guerra, o crescimento foi declinando devido ao baixo custo do gás natural, que se tornou grande atrativo em aquecimento de residências. O crescimento da indústria solar só retomou seu crescimento durante a crise do petróleo em 1973. Essa crise fez com que o mundo percebesse a necessidade de se buscar fontes alternativas a aquelas já existentes. No entanto, nota-se que os equipamentos ou procedimentos que utilizam energia solar como meio de aquecimento ainda são utilizados de maneira irrisória na maioria dos países.

Atualmente, o mundo produz somente 4 GW de energia elétrica, obtida com a energia solar. Esse valor equivale a um terço da energia produzida pela usina hidrelétrica de Itaipu, em um

ano. A previsão é de que em 2010, a produção se iguale a meia Itaipu por ano (CEBI, 2007; BAPTISTA, 2006).

A maior usina solar do mundo está em construção na China, na cidade de Dunhuang, região noroeste do país e levará cinco anos para estar pronta. O sistema terá capacidade de 100 MW de energia e contará com um investimento de 765 milhões de dólares (CEBI, 2006).

O Brasil ocupa o 8º lugar mundial no número de equipamentos solares instalados no país. Entretanto, esse número não representa uma grande utilização deste tipo de equipamento e a porcentagem de energia produzida por meio da energia solar é praticamente insignificante, quando comparada com outras fontes de obtenção de energia no país, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Distribuição das fontes energéticas no Brasil.

Fonte Energética	MW produzidos	%
Hidroelétrica ⁽¹⁾	70,14	70
Gás natural	10,09	10
Petróleo	5,25	5,3
Carvão	1,42	1,4
Nuclear	2,00	2,1
Biomassa	3,07 ⁽²⁾	3
Eólica	0,28	-
Solar	0,15	-
Importada	8,17	8,2
Total	100,57	100%

⁽¹⁾ Incluindo 1,75 MW de pequenas centrais hidrelétricas - PCHs.

⁽²⁾ 71% proveniente do bagaço de cana de açúcar.

Fonte: MME (2007).

Uma comparação entre os números de coletores solares instalados na Alemanha e no Brasil, nos dá uma idéia de quanto o Brasil pode ampliar o uso de energia solar em seu território. Na Alemanha que é um país com 80 milhões de habitantes e têm um clima extremamente frio,

existem quatro milhões de metros quadrados de coletores solares instalados, enquanto que no Brasil, com uma população de quase 184 milhões de habitantes e um clima propício para o uso da energia solar, há apenas três milhões de metros quadrados de coletores solares instalados (BAPTISTA, 2006).

Para reverter este quadro, o governo pretende investir na busca de energias alternativas para reduzir o consumo de energia elétrica e/ou ampliar a oferta usando os recursos naturais do país. Com esse intuito, em abril de 2002, o Congresso Nacional aprovou a Lei 10438, que estabelece em seu Artigo 3º a criação do PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas, que incentiva a geração de energia elétrica a partir das fontes: eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa (BAPTISTA, 2006).

A energia solar não consta no programa PROINFA, aprovado pelo governo. Mas, a iniciativa do uso de energias alternativas com o apoio governamental, gera uma esperança da ampliação dos investimentos em outras fontes de energia alternativa, englobando então o uso de equipamentos solares.

Uma das limitações à expansão da utilização de projetos que utilizem a energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, o que torna necessário o uso de grandes áreas para a instalação dos coletores solares, que captam a energia. Este fato torna o processo oneroso e faz-se necessário um maior investimento em pesquisas de tecnologias que venham proporcionar a execução de projetos solares dentro de padrões economicamente aceitáveis.

Porém, enquanto aguardamos este estágio de desenvolvimento da tecnologia, muita coisa poderá ser feita utilizando a tecnologia solar atualmente disponível, principalmente no campo da utilização da energia solar em processos térmicos que exijam baixas e médias temperaturas.

As vantagens do uso de energia solar são superiores à suas limitações e espera-se que haja uma expansão do uso de equipamentos solares, não somente nas indústrias como nas residências. Dentre as principais vantagens do uso da energia solar destacam-se:

- O uso da energia solar na produção de água aquecida evita o consumo de: 55 kg de GLP por ano, 66 litros de óleo diesel por ano, 215 kg de lenha por ano e a inundação de 56 m² de terras, para cada m² de coletor solar instalado (ASTROSOL, 2006);
- A energia solar incidente sobre um milésimo da superfície da Terra, com uma eficiência de apenas 1 %, representa oito vezes todo o consumo mundial de energia dos dias atuais ($4,32 \times 10^{19}$ J) (BEZERRA, 1998);
- A tecnologia envolvida para o aproveitamento de energia solar é bastante simples e está ao alcance de todos os países, principalmente os países em desenvolvimento;
- A energia solar não necessita ser extraída, refinada e nem transportada para o local onde será utilizada;
- O investimento inicial se paga ao longo do tempo, devido à economia de energia ou de combustível;
- A energia solar não polui e nem prejudica o ecossistema;
- A energia solar é abundante e permanente;
- A energia solar é renovável a cada dia e
- A energia solar é gratuita.

A energia solar pode ser utilizada para diversos fins, como: secagem de grãos, climatização de ambientes, concentração de substâncias diluídas, obtenção de água potável, obtenção de

energia elétrica e aquecimento de água tanto para uso residencial quanto para uso industrial (PRADO, 1980) em diferentes etapas dos processos produtivos.

Um exemplo de etapa que envolve uma grande quantidade de energia na indústria é a evaporação. A maior parte da energia gasta no processo de evaporação é proveniente do consumo das caldeiras para gerar vapor vivo, que é utilizado como meio de aquecimento nos evaporadores. O combustível utilizado na caldeira pode ser substituído por energia solar, apresentando grandes vantagens ambientais e econômicas.

2.2 Evaporação empregando energia solar como meio de aquecimento

A evaporação empregando energia solar como meio de aquecimento está sendo considerada como um processo alternativo, em um número crescente de aplicações em diversos tipos de indústrias, como: laticínios, têxtil, curtumes, papel, bebidas (cerveja, vinho), conservas (vegetais, carnes, peixe) e pneus (KALOGIROU, 2003).

A indústria brasileira já produz sistemas que se utilizam desse tipo de processamento térmico, em que a energia proveniente do Sol é transformada em energia térmica a baixa e média temperatura. Os resultados obtidos mostram-se promissores e sua utilização vem crescendo com o passar do tempo. Para se ter uma idéia do crescimento da implantação desses equipamentos, Baptista, 2006 cita o exemplo da região de Porto Seguro (BA), onde, nos últimos cinco anos, mais de 250 hotéis e pousadas instalaram coletores solares.

A evaporação solar pode ser empregada em duas aplicações distintas: para concentrar soluções diluídas provenientes de processos industriais (enfoque deste trabalho) e para a dessalinização de águas subterrâneas na obtenção de água potável. Para utilizar o coletor de

placa plana na concentração solar deve-se deixá-lo exposto ao ambiente, ou seja, não é necessária a presença da cobertura de vidro. Mas para utilizar o coletor como dessalinizador solar é necessário a colocação de uma cobertura de vidro sobre toda a superfície do coletor solar.

A concentração e dessalinização solar produzem (na saída do coletor) uma solução concentrada, como subproduto. Essa solução apresenta uma elevada concentração de sais, sendo considerada um poluente.

Alguns autores estudaram alternativas para a destinação final ou a utilização desta solução concentrada. Dentre esses autores destacam-se: Amorim; Porto e Silva Júnior (2007); Soares et al. (2006) e Proença (2002).

Uma das alternativas apresentada por Soares et al. (2006) e Proença (2002) foi uma redução do volume da solução pela evaporação solar, seguida de uma cristalização. Neste caso, o rejeito transforma-se em um produto sólido que poderá ser utilizado como complemento alimentar para animais (principalmente o gado).

Amorim; Porto e Silva Júnior (2007); Soares et al (2006) e Proença (2002) propõem a utilização da solução concentrada em piscinas especiais, visando à criação de certas espécies de peixes marinhos e de camarão, gerando uma renda extra para a família beneficiada com a dessalinização.

Outra solução apontada por Amorim; Porto e Silva Júnior (2007) e Soares et al. (2006) é a utilização da solução concentrada para irrigar plantas halófitas que apresentam alta tolerância aos sais e elevado poder nutritivo. Esse tipo de planta pode ser usada como alimento para a criação de animais, presentes na região.

2.2.1 Emprego da energia solar na concentração de soluções

O esquema do evaporador solar utilizado neste trabalho e em outros trabalhos encontrados na literatura (LEU; JANG; CHOU, 2006; MEZAACHE; DAGUENET, 2005; SRITHAR; MANI, 2003; HONGFEI, 2001; SONG et al., 1998; SARTORI, 1996; YAN; SOONG, 1994), pode ser visto na Figura 2.1. Neste tipo de sistema é utilizado um coletor solar do tipo placa plana, sem a cobertura de vidro. A superfície da placa atuará como um evaporador de filme descendente, concentrando soluções que escoam sobre sua superfície.

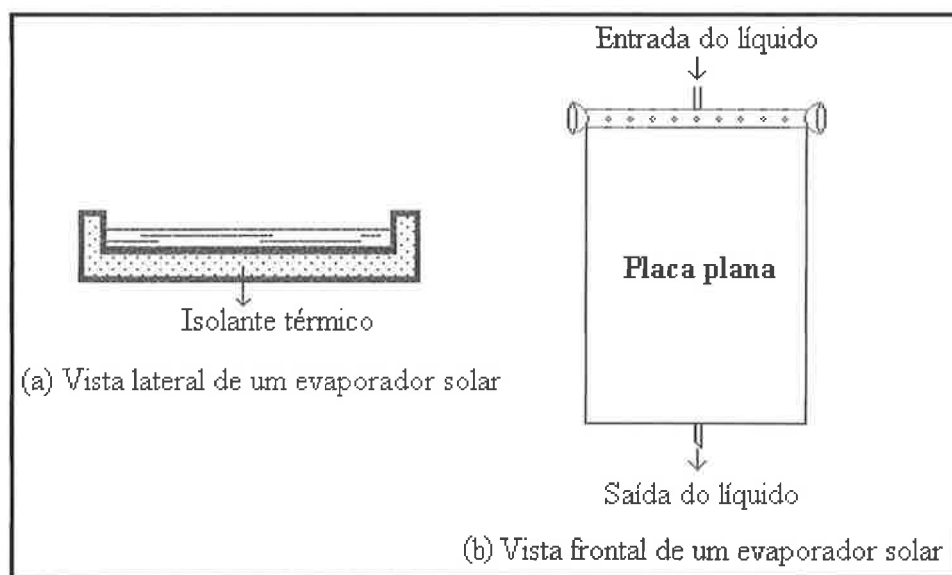


Figura 2.1. Esquema de um evaporador solar. Fonte: Bezerra (1998).

A solução é introduzida na placa plana e escoam sob a forma de um filme descendente sobre toda superfície da placa, que deve ser pintada de preto, para ocasionar uma maior absorção de radiação solar. Essa radiação será absorvida e transformada em energia térmica, acarretando um aumento de temperatura da placa. Quando a solução entra em contato com a superfície preta aquecida, aumenta sua temperatura e evapora parte de seu solvente.

Visando à redução das perdas, é necessário à colocação de algumas camadas de isolante na parte inferior da placa para reduzir a passagem de calor e garantir que quase todo calor absorvido na placa seja utilizado para aquecer o fluido, durante o escoamento.

ASHRAE (1996, apud Rosa, 2003) recomenda que o material utilizado como isolante deva resistir à temperatura de 477,15 K sem produzir substâncias voláteis. Outras características desejáveis aos isolantes, são: baixa condutibilidade térmica, baixo custo, boa resistência mecânica e durabilidade quando exposto à ação de intempéries.

Os materiais que mais são empregados como isolantes térmicos, são: fibra mineral, fibra cerâmica, espuma de vidro, espuma de plástico ou fibra de vidro.

O uso da evaporação solar para concentrar soluções diluídas (na maioria dos casos efluentes industriais) mostra-se eficaz com solutos prejudiciais à saúde ou ao meio ambiente (MACEDO, 1996). A evaporação solar também pode ser usada na concentração de soluções visando apenas uma redução de volume.

Vale a pena ressaltar que há uma maior quantidade de trabalhos publicados com o enfoque em dessalinização solar e aquecimento solar de água, tanto para uso industrial quanto residencial, do que trabalhos publicados com o enfoque em evaporação solar.

A evaporação solar foi estudada por diversos autores, dentre os quais se destacam: Srithar e Mani (2003); Ambrosini, Forgione e Oriolo (2002); Budin, Mihelic-Bogdanic e Filipan (1998) e Sartori (1996).

Srithar e Mani (2003) realizaram um estudo para concentrar o efluente de um curtume (composto basicamente de sais, sendo o principal deles o cloreto de sódio), localizado na cidade de Madurai - Índia, utilizando a energia solar como meio de aquecimento. Comprovaram experimentalmente que a taxa de evaporação de água, presente no efluente,

aumenta quando se diminui: a concentração da alimentação e a vazão de alimentação e ainda quando o ambiente apresenta-se com: maiores valores de radiação solar; menores valores de umidade relativa ou maiores valores de velocidade do vento. As variáveis meteorológicas foram mantidas constantes durante os experimentos, pois os mesmos foram realizados em ambientes fechados e controlados. Essas conclusões poderiam ser obtidas com base nos fenômenos de transporte.

Um outro trabalho interessante, apresentado por Ambrosini, Forgione e Oriolo (2002), visa a concentração de soluções que escoam sobre uma superfície aquecida e inclinada. O aquecimento da superfície não utiliza a energia solar como meio de aquecimento, e sim um sistema elétrico composto de 100 aquecedores modulares, situados no lado traseiro da placa plana. Destacam-se aspectos importantes, a saber:

- Com o aumento da vazão surge a presença de ondas grandes, caracterizando o escoamento laminar com ondas, com Reynolds variando entre 400 e 1200 [$Re = \frac{4\Gamma}{\mu}$, em que Γ é a vazão de líquido por perímetro (kg/s.m) e μ é a viscosidade dinâmica do líquido (kg/s.m)];
- A velocidade de onda mostrou-se independente da inclinação para baixos valores de Reynolds, tornando-se cada vez mais influenciado por este parâmetro para valores elevados de vazão;
- A inclinação da placa influencia o escoamento do líquido sobre a mesma, pois foi verificado que o filme apresenta características diferentes de espessura e de quantidade de picos de onda, para uma mesma vazão (0,2 kg/s) e diferentes inclinações (posição vertical e 45°), como mostrado na Figura 2.2.

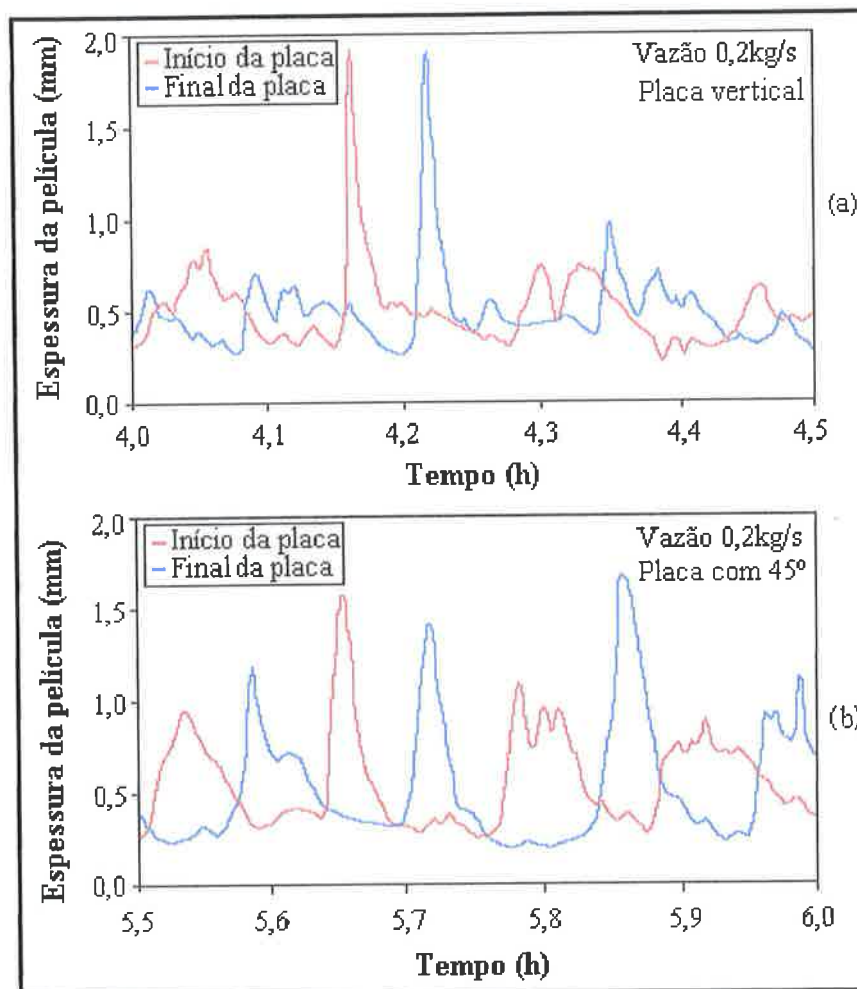


Figura 2.2. Variação da espessura de película com a placa plana em diferentes inclinações. Fonte: Ambrosini, Forgione e Oriolo (2002).

- Nesta figura observa-se que a placa plana na posição vertical [Figura 2.2(a)] apresenta um filme com: menor espessura e menor quantidade de picos de onda, do que a placa inclinada em 45° [Figura 2.2(b)]. Este fato pode ser explicado porque o escoamento é mais rápido com a inclinação vertical do que com a placa inclinada. A partir dessa observação, os autores comprovam a importância de estudar a inclinação de placas planas quando se deseja evaporar o líquido que escoar sobre sua superfície, uma vez que este fato afeta a taxa de evaporação;

- E por fim, os autores verificaram que ao fixar uma malha metálica sobre uma faixa, localizada no início da placa plana, ocorre uma distribuição de líquido de maneira mais eficiente.

No estudo que está sendo realizado, a malha (chamada de promotor de película) não será aderida somente em uma faixa localizada no início da placa, e sim sobre toda superfície da placa, ocasionando a formação e a manutenção de um filme mais estável e uniforme sobre toda a superfície, gerando circunstâncias mais adequadas à evaporação.

Um estudo enfocando a substituição parcial de combustíveis fósseis foi realizado por Budin, Mihelic-Bogdanic e Filipan (1998), em uma planta industrial de evaporação de NaNO_3 . Os autores compararam dois processos industriais, no primeiro processo o condensado de caldeiras foi utilizado como meio de pré-aquecimento da alimentação e no segundo foi utilizada energia solar. Verificaram que reutilizando o calor dos condensados de caldeiras, para pré-aquecer a alimentação, obtinham um ganho de 23 % no consumo de combustíveis, enquanto esse ganho aumentava para 54 % quando se utilizava coletor solar (com uma área total de 8630 m²) para pré-aquecer a alimentação. Esse ganho pode chegar a 77 % quando se reaproveita o calor sensível do condensado que sai dos coletores, para pré-aquecer a solução antes de entrar no coletor solar.

O coletor solar citado no parágrafo anterior, necessita de uma grande área de troca térmica, utilizada para pré-aquecer a solução. Este fato acarreta em um valor de investimento inicial muito elevado e faz-se necessário um estudo mais detalhado para verificar a viabilidade do sistema, justificando o investimento.

Uma outra aplicação para o evaporador solar é seu uso como dessalinizador solar. Para que o equipamento seja utilizado com essa finalidade, deve-se colocar uma superfície de vidro sobre

o coletor solar, onde a água evaporada será condensada e armazenada para posterior utilização como água potável.

Sartori (1996) apresentou uma comparação entre um evaporador solar e um dessalinizador solar, ambos instalados na cidade de João Pessoa. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que os evaporadores solares atingem valores mais elevados de taxa de evaporação, quando comparados com os dessalinizadores solares, para as mesmas condições operacionais. Esses resultados podem ser visualizados na Figura 2.3.

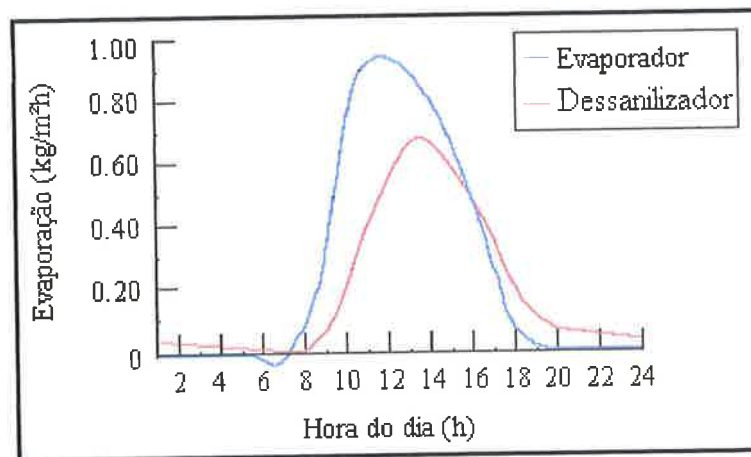


Figura 2.3. Comparação das taxas de evaporação do evaporador e do dessalinizador solar.

Fonte: Sartori (1996).

Para explicar o fenômeno que ocorre com o evaporador solar e o dessalinizador solar mostrado na Figura 2.3 é preciso avaliar três situações distintas (mostradas na Figura 2.4), considerando a temperatura da água (T_a), a temperatura de orvalho (T_o) e a temperatura ambiente (T_∞):

a) $T_\infty > T_a < T_o$ (fato que ocorre nas primeiras horas da manhã):

Este horário corresponde a Figura 2.4 (a), em que se observa a ocorrência da condensação (“evaporação negativa”) na superfície do evaporador, pois a umidade do ar condensa sobre o filme de água que escoar sobre a superfície do coletor solar.

Esse fato não ocorre no dessalinizador, pois a umidade do ar condensa sobre a cobertura de vidro. Nota-se que mesmo nas primeiras horas do dia, há uma pequena quantidade de água coletada para ser utilizada como água potável. Essa água não é proveniente da evaporação e sim da condensação da umidade do ar sobre a superfície do vidro.

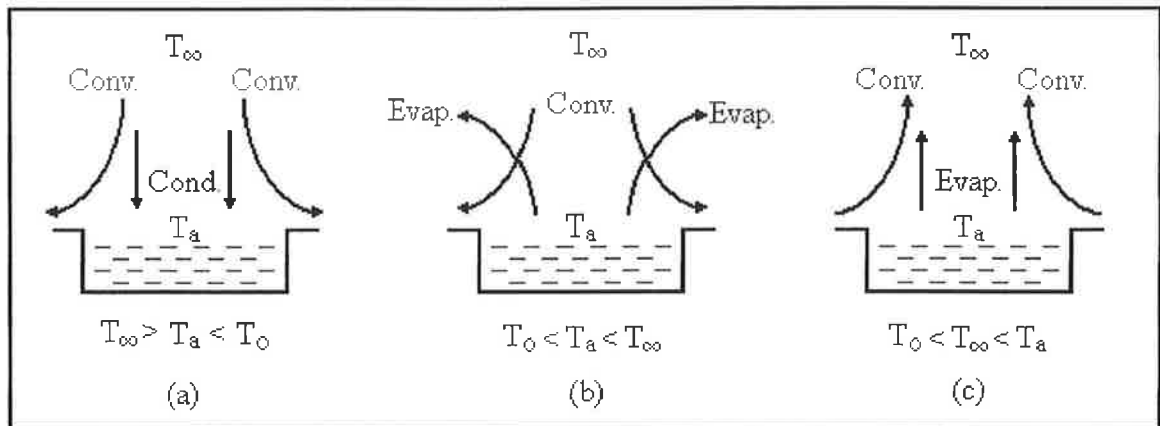


Figura 2.4. Fluxo de massa na superfície livre exposta ao ar. Fonte: Sartori (1996).

b) $T_0 < T_a < T_\infty$:

Assim que T_a começa a aumentar, ficando entre o valor de T_0 e T_∞ , inicia-se a evaporação da água. Como mostrado na Figura 2.4 (b).

Observa-se que a dessalinização demora mais para iniciar do que a evaporação. Este fato ocorre porque a condensação do orvalho diminuiu a temperatura do vidro (T_w) e torna-se necessário aquecer primeiro a superfície do vidro, para depois iniciar a dessalinização;

c) $T_0 < T_\infty < T_a$:

A evaporação da água aumenta até que T_a atinja valores superiores ao de T_∞ como visualizado na Figura 2.4 (c), atingindo um valor máximo por volta das 13:00 horas.

Geralmente, após esse horário o índice de radiação solar começa a diminuir e

conseqüentemente a T_a também, acarretando em valores mais baixos de taxa de evaporação, até cessar a evaporação por volta das 19:00 horas.

Verifica-se que o comportamento do dessalinizador é semelhante, mas o valor máximo é obtido por volta das 14:00 horas, pois o efeito estufa dentro do dessalinizador aumenta a temperatura do ar contido no equipamento e mesmo com menores valores de radiação solar, a partir das 12:00 horas, a taxa de evaporação ainda se eleva até as 14:00 horas. Após esse horário a taxa de evaporação começa a decrescer, mas devido ao acúmulo de calor provocado pelo efeito estufa, a evaporação continua até depois do ocaso. A condensação de umidade do ar aumenta nas horas noturnas, obtendo água potável.

2.2.2 Emprego da energia solar na dessalinização de soluções

A dessalinização de soluções ocorre em um sistema parecido com o procedimento do evaporador solar descrito anteriormente, a principal diferença é que no dessalinizador solar há uma cobertura de vidro sobre a superfície da placa plana.

O esquema de um dessalinizador solar convencional pode ser visto na Figura 2.5.

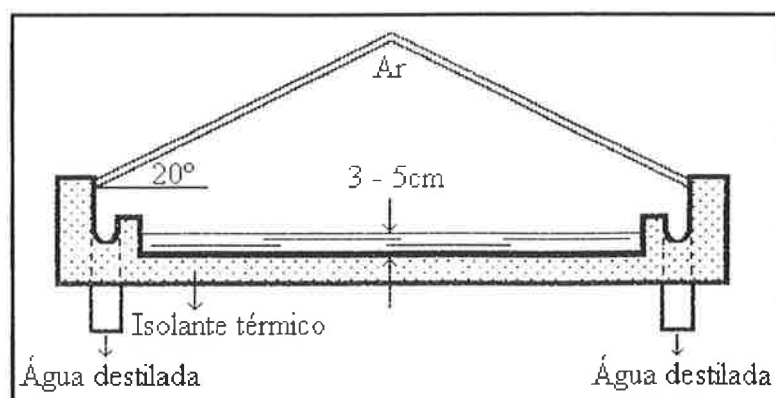


Figura 2.5. Esquema de um dessalinizador solar convencional. Fonte: Bezerra (1998).

Neste tipo de dessalinizador, a salmoura a ser dessalinizada é introduzida em cubas até que estas fiquem com um nível máximo de 5 cm de altura. A cuba deve ser completamente coberta por um vidro e a superfície do fundo deve ser pintada de preto, ocasionando uma maior absorção de calor. Na maioria dos casos o vidro é colocado com uma inclinação de 20° em relação a horizontal (BEZERRA, 1998).

A radiação solar que incide sobre o dessalinizador atravessa a placa de vidro e chega à superfície negra, onde é absorvida. Como a superfície do fundo da cuba foi enegrecida, passa a agir como um corpo negro e emite radiação eletromagnética. A radiação infravermelha com comprimento de onda superior a 4 μm é refletida pelo vidro, e o restante será liberado para o ambiente. O aprisionamento da radiação infravermelha ocasiona um efeito estufa, visualizado na Figura 2.6., que acarretará em um aumento de temperatura do ar encerrado na cuba a valores superiores à temperatura do ambiente. O fundo da cuba deve estar termicamente isolado para evitar dispersão do calor para baixo (ADIR, 1985).

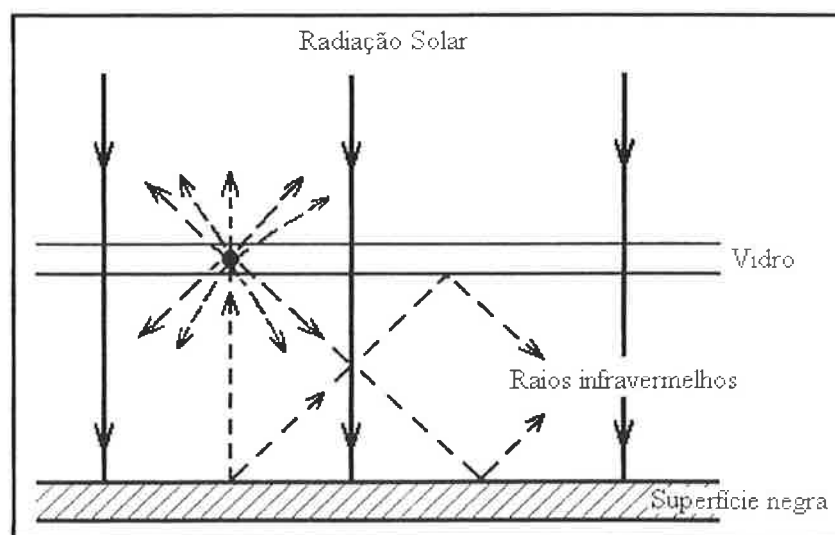


Figura 2.6. Efeito estufa em um dessalinizador. Fonte: Adir (1985).

A salmoura que está em contato com a superfície negra é aquecida e evapora parte de seu solvente. O ar aquecido fica saturado com a presença de gotículas provenientes da evaporação e quando entra em contato com o vidro (que funciona como um trocador de calor com o ambiente), resfria-se e condensa na parede interna dos vidros a água que contém. A água escorre sobre a superfície interna dos vidros e é recolhida por canaletas laterais, presentes no equipamento e armazenada para ser utilizada como água potável (ALDABÓ, 2002; COMETTA, 1978).

Uma vez instalado, o dessalinizador solar oferece uma facilidade de manutenção. Esta se restringe a manter o nível de água salgada, para repor a água evaporada e eliminar os depósitos salinos da cuba, semanalmente (ALDABÓ, 2002; COMETTA, 1978).

Para se ter uma idéia da área necessária para a instalação de dessalinizadores solares Palz (1981) cita que: um dessalinizador de 10 m x 100 m é capaz de produzir até 4 m³ de água potável por dia e considerando um consumo diário médio de 15 litros por pessoa, esse dessalinizador seria capaz de produzir água fresca para 260 pessoas. Analisando esta informação verifica-se que a instalação deste sistema de obtenção de água potável seria inviável para cidades grandes, pois ocupa uma grande área para a instalação dos coletores, sendo justificada sua instalação apenas em pequenas regiões ou em zonas áridas, pois nesses locais, essa pode ser a única solução para se obter água potável.

Bouchekima et al. (2001) apresentaram um estudo de dessalinização de águas subterrâneas, em zonas áridas do Saara, com o objetivo de obter água potável. Realizaram experimentos com dois tipos de dessalinizadores. Os resultados obtidos com o dessalinizador solar foram superiores do que os resultados obtidos com o dessalinizador convencional.

No Brasil este processo poderia ser aplicado em zonas do semi-árido, localizadas principalmente no nordeste do país, onde a escassez de água potável é grande e os níveis de radiação solar incidente são elevados, praticamente o ano todo.

O uso da energia solar para obtenção de água potável a partir de águas subterrâneas que contenham níveis salinos em desacordo com a legislação, ou ainda que sejam prejudiciais à saúde, mostra-se eficaz, mas essa tecnologia não tem sido desenvolvida comercialmente por apresentar um baixo rendimento e um alto investimento inicial (MACEDO, 1996).

A legislação vigente no Brasil estipula o limite permitido de sólidos dissolvidos na água potável em 0,15 %. Há uma grande variação neste índice de acordo com a procedência da água, por exemplo, a água proveniente do Mar Báltico apresenta um índice de sólidos dissolvidos de 0,7 % ao passo que a concentração de sólidos na água proveniente do Golfo Pérsico chega a índices de até 4,3 %. A maior parte das águas que são extraídas do subsolo brasileiro apresenta índices entre 0,2 % e 0,5 %, sendo chamadas de águas salobras (ADIR, 1985; PALZ, 1981).

Macedo (1996) relata que a presença de carbonatos em altas concentrações na água potável, além de afetar o paladar é prejudicial à saúde, ocasionando mal estar e diarreias. Por este motivo apresenta várias técnicas para a dessalinização da água e ressalta o uso da energia solar para esse fim. Essas técnicas foram empregadas em centros turísticos localizados nas Ilhas Canárias, nas Ilhas do Caribe e na Ilha de Fernando de Noronha (maior ilha pertencente ao arquipélago Fernando de Noronha), além de unidades em pequenas comunidades nos estados de Pernambuco e Ceará.

Hongfei (2001) apresentou um projeto de dessalinização solar visando um aumento de rendimento de um processo industrial para a obtenção de água potável. O equipamento

utilizado pelo autor foi um evaporador de filme descendente com uma cobertura de vidro e um trocador de calor utilizado para pré aquecer a alimentação (salmoura). A salmoura inicialmente em temperatura ambiente foi introduzida no trocador de calor e absorveu uma fração considerável de calor latente e sensível da salmoura concentrada e aquecida que saiu da placa plana e foi introduzida no trocador de calor circulando contra corrente. Na saída do trocador a salmoura concentrada foi descartada. A salmoura pré-aquecida foi introduzida no evaporador de filme descendente, formando um filme na superfície da placa plana. O filme foi aquecido por energia solar e evaporou parte de seu solvente que foi condensado na superfície interna do vidro sobre o coletor. O condensado escorreu sobre o vidro e foi recolhido em canaletas laterais, presentes no evaporador e armazenado para ser utilizado como água potável. O autor verificou que dessalinizadores solares apresentam uma baixa produtividade (1 m³ de água para cada m² de superfície exposta, por ano, apresentando uma eficiência de 30 %). O rendimento deste procedimento foi aproximadamente duas a três vezes maior do que aquele que utiliza um tipo convencional de dessalinizador solar, sem pré-aquecimento de solução.

Uma pesquisa apresentada por Kunze (2001) utiliza a dessalinização de águas, utilizando áreas remotas para instalação dos coletores solares, para obtenção de água potável. O autor mostrou que dessalinizadores solares convencionais obtêm 6 litros de água potável para cada m² de superfície exposta por dia, sem pré-aquecimento da alimentação e com convecção natural. Pode-se chegar a obter valores de 20 litros de água potável para cada m² de superfície exposta por dia, recuperando calor da solução concentrada para pré-aquecer a alimentação e induzindo convecção forçada.

O processo de evaporação solar é influenciado por variáveis meteorológicas e principalmente pelo valor de radiação solar incidente sobre o equipamento.

2.3 A radiação solar

Toda a radiação solar que chega à Terra é proveniente do Sol, na forma de ondas eletromagnéticas, sendo indispensável para a existência da vida. A energia solar é produzida na região central do Sol, onde as temperaturas variam de 8×10^6 K a 40×10^6 K e é transferida para a superfície onde a temperatura encontra-se em média a 5762 K, temperatura próxima a do corpo negro (6000 K). A superfície do Sol irradia energia numa quantidade equivalente à energia irradiada por um corpo negro, portanto o Sol pode ser considerado como um corpo negro (ROSA, 2003).

A superfície do Sol emite uma radiação em torno de 72 milhões de W/m^2 , mas ao se deslocar, com a velocidade da luz através do espaço, essa emissão vai se dispersando e chega à órbita da Terra com 1367 W/m^2 , onde seu aproveitamento faz-se tanto como fonte de calor quanto como fonte de luz. Esse valor é chamado de constante solar (G_{sc}) (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

O termo radiação é utilizado para referir-se genericamente ao fenômeno da energia eletromagnética que atinge a Terra, proveniente do Sol e o termo irradiância é utilizado para denominar o fluxo de energia eletromagnética por unidade de superfície, dada por kWh/m^2 (ROSA, 2003).

A atmosfera da Terra reflete uma parte da radiação incidente, de volta para o espaço. A parte da radiação solar que penetra na atmosfera é absorvida ou espalhada por esta. A parcela da radiação que foi espalhada pela atmosfera, atinge o solo, que absorve uma grande quantidade desta radiação e reflete uma pequena quantidade. A Figura 2.7 mostra a porcentagem de cada parcela que é absorvida ou refletida.

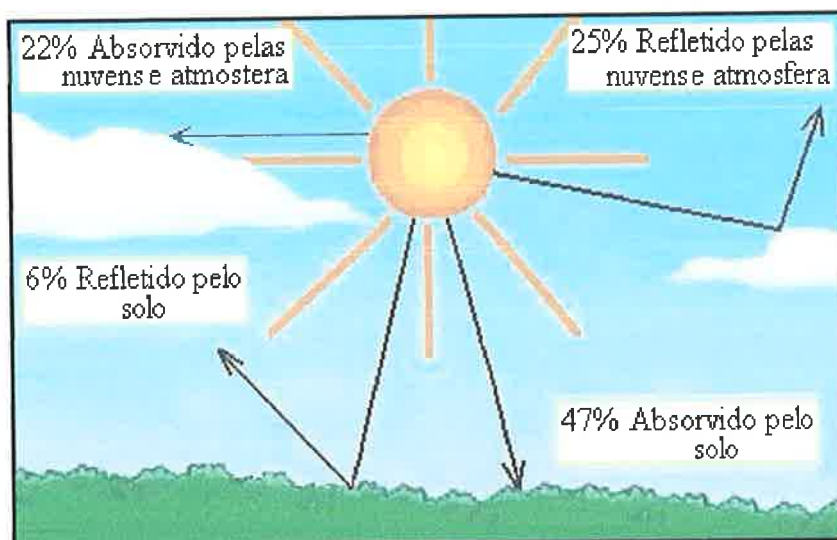


Figura 2.7. Porcentagem da radiação solar absorvida e refletida. Fonte: Elaboração própria, a partir de dados de Rosa (2003).

Uma definição dos diferentes tipos de radiação solar foi realizada pelos autores Cáceres-Vásquez, Rodríguez e Fernández-Alba (2003):

- Radiação direta: Corresponde à radiação proveniente do Sol que atinge a superfície sem ter sido desviada, ou seja, os raios saem do Sol e atingem diretamente a superfície terrestre sem mudar seu ângulo de inclinação.
- Radiação difusa: Corresponde a parte da radiação que atinge a superfície após ter seu ângulo de incidência desviado pelas nuvens, partículas de poeiras e moléculas dos gases e vapores existentes na atmosfera. Apresentam-se em uma infinidade de direções.
- Radiação global: Corresponde à soma da radiação direta e da radiação difusa.

A radiação difusa representa 10 a 16 % da radiação direta que chega à superfície da Terra num dia ensolarado e sem nuvens, 50 % com o tempo parcialmente nublado e corresponde à radiação global em dias completamente cobertos (BEZERRA, 1998).

A radiação direta é dez vezes superior à radiação difusa quando o Sol está próximo do zênite (sol do meio-dia) e praticamente igual quando o Sol está próximo do horizonte (PALZ, 1981).

A quantidade de radiação solar que atinge um determinado ponto da superfície terrestre sofre à interferência de alguns fatores, como:

a) LATITUDE (ϕ):

A latitude é determinada pela distância de um lugar qualquer da superfície terrestre até a linha do Equador (latitude de 0°), que divide a terra em dois Hemisférios: o Norte e o Sul (BEZERRA, 1998). Para o Hemisfério Norte a latitude varia de 0° até 90° e para o Hemisfério Sul a latitude varia de 0° até -90° (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

b) LONGITUDE:

A longitude é determinada pela distância de um lugar qualquer da superfície terrestre até o Meridiano de Greenwich (longitude de 0°), que divide a terra em dois Hemisférios: o Oriental e o Ocidental (BEZERRA, 1998). Segundo Duffie e Beckman, 1980, no Hemisfério Oriental a longitude varia de 0° até 180° e no Hemisfério Ocidental a longitude varia de 0° até -180° .

c) HORA DO DIA:

A cada hora do dia os raios provenientes do Sol atingem a superfície sob diferentes ângulos;

d) MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO:

Devido ao movimento de translação, ocorrem na Terra diferentes estações durante o ano, que podem ser visualizadas na Figura 2.8. Quando numa determinada cidade é verão, ela encontra-se mais iluminada pelo Sol e conseqüentemente apresenta temperaturas maiores.

Então, ali os dias são mais longos e as noites mais curtas, enquanto no inverno ocorre o contrário.

Devido à órbita elíptica, a Terra está mais próxima do Sol em janeiro (período chamado de periélio) e mais afastada no início de julho (período chamado de afélio). A diferença entre esses períodos, no que diz respeito à radiação solar pode chegar a 7 % (BEZERRA, 1998). Este fenômeno é quase imperceptível em regiões próximas do Equador terrestre onde as cidades são constantemente iluminadas pelo Sol e a sensação é de verão durante o ano todo.

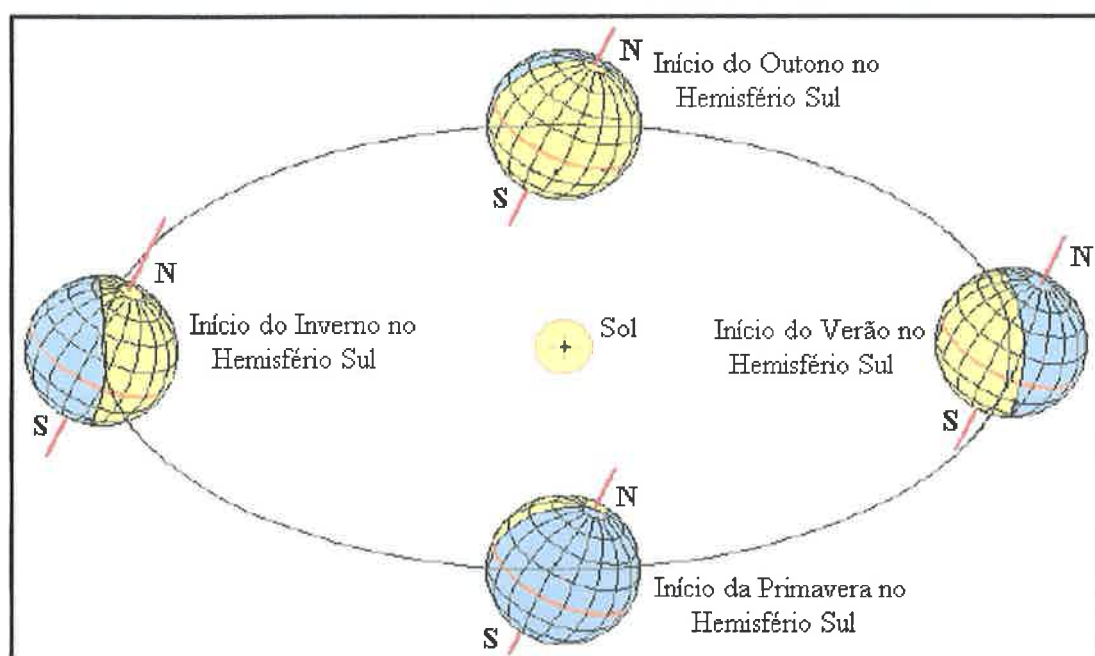


Figura 2.8. Ocorrência das estações do ano no hemisfério sul. Fonte: Alves (2006).

e) DECLINAÇÃO SOLAR (δ):

A declinação solar é definida como sendo o ângulo formado entre os raios solares e o plano do Equador. Pode-se dizer que o valor da declinação solar varia entre $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$

como mostra a Figura 2.9.e que estes valores podem ser calculados, segundo os autores Duffie e Beckman (1980), com o uso da equação (2.1).

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.1)$$

Em que: n é o número correspondente ao dia do ano (varia de 1 a 365 ou de 1 a 366 para anos bissextos).

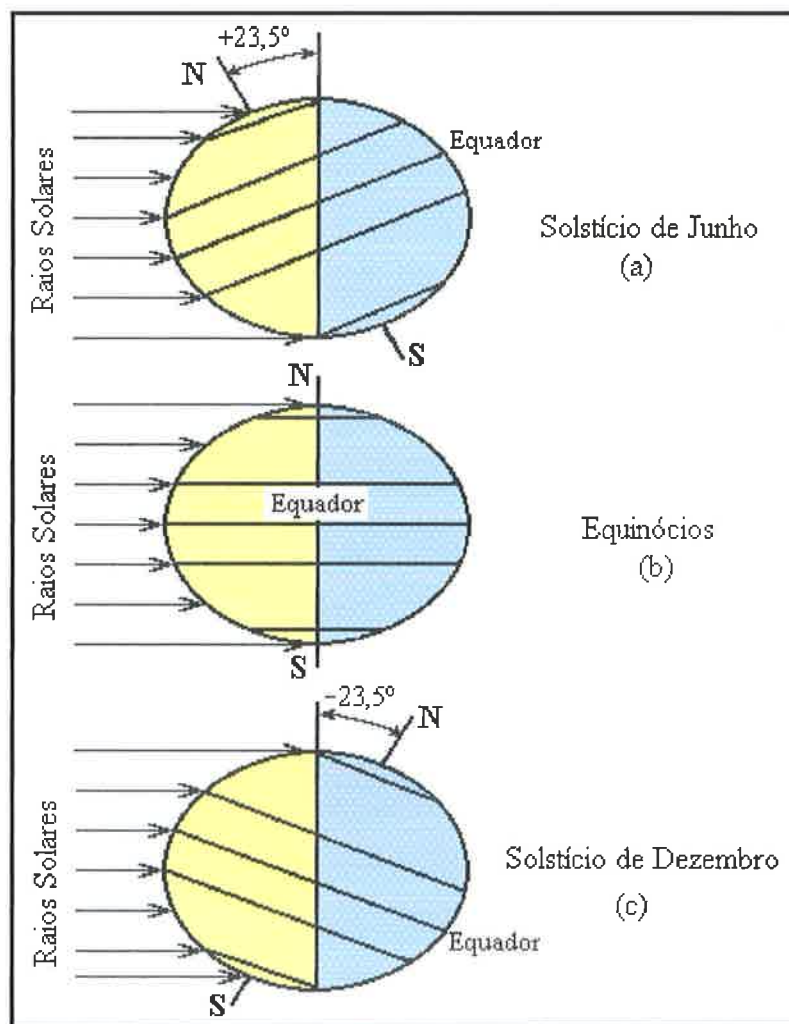


Figura 2.9. Ângulo de declinação solar. Fonte: Alves (2006).

Do mês de março até o mês de junho, o Hemisfério Sul vai ficando cada vez menos exposto aos raios solares e conseqüentemente os dias ficam mais curtos e as noites mais

longas até que, no dia 22 de junho ocorre à noite mais longa do ano, chamada de solstício de inverno, representada na Figura 2.9(a). Nessa data ocorre o valor máximo de declinação solar ($+23,45^\circ$) e tem início o inverno. Nota-se que os raios solares não ultrapassam o Círculo Polar Antártico (latitude de $66^\circ 33'S$). Por esse motivo, os pontos situados entre o Círculo Polar Antártico e o Pólo Sul não são atingidos pelos raios solares permanecendo inteiramente no escuro. Nesta ocasião à noite tem duração de 24 horas. Enquanto isso, no Hemisfério Norte, os pontos situados entre o Círculo Polar Ártico (latitude de $66^\circ 33'N$) e o Pólo Norte ficam inteiramente iluminados e o dia tem duração de 24 horas.

Neste mesmo período, no Hemisfério Norte ocorre exatamente o contrário, ou seja, a data de 22 de junho marca a noite mais curta do ano, chamado de solstício de verão e constata-se o início do verão neste Hemisfério.

Do mês de junho até o mês de setembro, o Hemisfério Sul vai ficando cada vez mais exposto aos raios solares e conseqüentemente os dias ficam mais longos e as noites mais curtas até que no dia 22 de setembro a duração do dia é a mesma que a duração da noite. Este fenômeno é chamado de equinócio da primavera e está representado na Figura 2.9(b).

Neste mesmo período, no Hemisfério Norte ocorre exatamente o contrário, ou seja, o Hemisfério Norte vai ficando cada vez menos exposto aos raios solares e os dias vão ficando mais curtos e as noites mais longas até que no dia 22 de setembro a duração do dia é a mesma que a duração da noite. Este fenômeno é chamado de equinócio do outono e está representado na Figura 2.9(b).

Nos equinócios, os raios solares incidem perpendicularmente sobre a linha do Equador e os dois hemisférios são igualmente iluminados e aquecidos. Nesta ocasião a noite e o dia duram cerca de 12 horas cada um, em todos os lugares da Terra.

Do mês de setembro até o mês de dezembro o Hemisfério Sul continua mais exposto aos raios solares e conseqüentemente os dias ficam cada vez mais longos e as noites cada vez mais curtas até que, no dia 22 de dezembro ocorre a noite mais curta do ano, chamada de solstício de verão, representado na Figura 2.9(c). Nessa data ocorre o valor mínimo de declinação solar ($-23,45^\circ$) e tem início o verão. Nota-se que os raios solares não ultrapassam o Círculo Polar Ártico e por esse motivo, os pontos situados entre o Círculo Polar Ártico e o Pólo Norte não são atingidos pelos raios solares permanecendo inteiramente no escuro. Nesta ocasião à noite tem duração de 24 horas. Enquanto isso, no Hemisfério Sul, os pontos situados entre o Círculo Polar Antártico e o Pólo Sul ficam inteiramente iluminados e o dia tem duração de 24 horas.

Neste mesmo período (de setembro a dezembro), ocorre no Hemisfério Norte exatamente o contrário, ou seja, a data de 22 de dezembro marca a noite mais longa do ano, chamado de solstício de inverno e constata-se o início do inverno neste Hemisfério.

Do mês de dezembro até o mês de março, o Hemisfério Sul vai ficando cada vez menos exposto aos raios solares e conseqüentemente os dias ficam mais curtos e as noites mais longas até que no dia 22 de março a duração do dia é a mesma que a duração da noite. Este fenômeno é chamado de equinócio de outono, representado na Figura 2.9(b).

Neste mesmo período, no Hemisfério Norte ocorre exatamente o contrário, ou seja, o Hemisfério Norte vai ficando cada vez mais exposto aos raios solares e os dias vão ficando mais longos e as noites mais curtas até que no dia 22 de março a duração do dia é a mesma que a duração da noite. Este fenômeno é chamado de equinócio de primavera, representado na Figura 2.9(b).

f) CONDIÇÕES DO CÉU: A quantidade de nuvens, fumaças, poluição e nebulosidade, presentes no céu, interferem na quantidade de radiação solar incidente no coletor.

A radiação solar chega a Terra em diferentes faixas de comprimento de onda. Cada uma destas faixas corresponde a uma região espectral diferente, variando de raios gama a ondas de rádio, como pode ser visualizado na Figura 2.10.

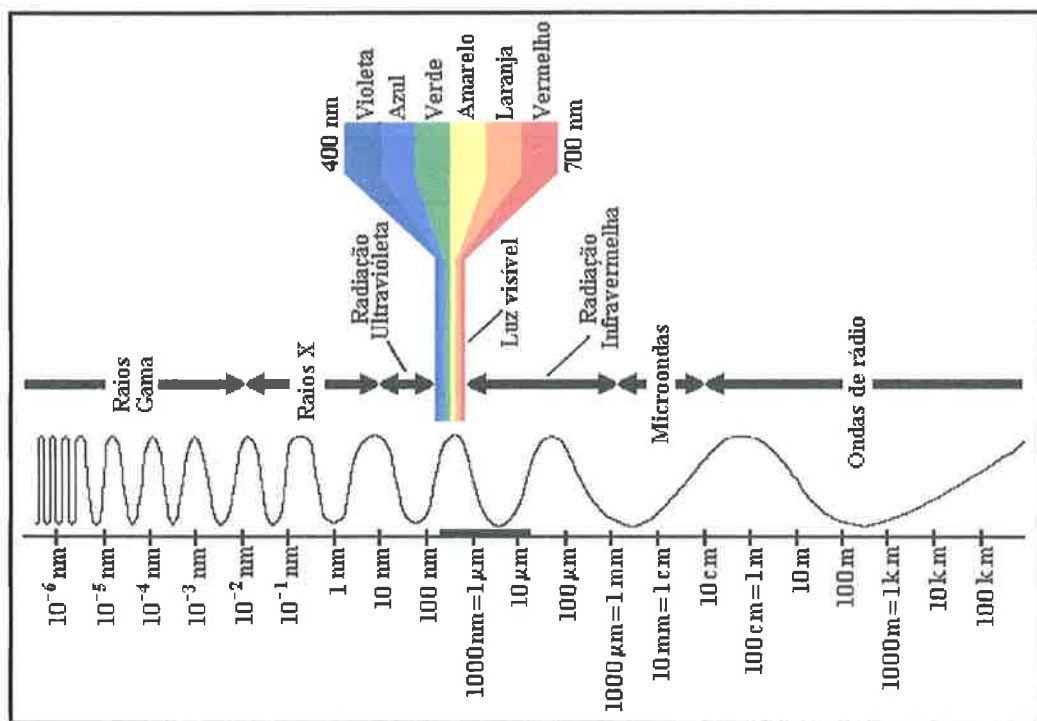


Figura 2.10 Espectro de radiação eletromagnética. Fonte: Silva (2004).

É importante salientar que os comprimentos de onda utilizados em estudos que empregam energia solar como meio de aquecimento, encontram-se entre a radiação ultravioleta e a radiação infravermelha e estão entre 0,3 μ m e 25 μ m (marcado na Figura 2.10), incluindo a luz visível ao olho humano (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Segundo Cruz (1980, apud Nogueira, 2005) a radiação com comprimentos de onda entre 10 e 400 nm é chamada de radiação ultravioleta, de 400 a 700 nm é chamada de radiação visível e acima de 700 nm é chamada de radiação infravermelha.

De toda radiação ultravioleta (UV) que incide sobre a estratosfera da Terra, uma parcela será absorvida, a saber: a radiação UV com comprimento de onda menor que 200 nm será totalmente absorvida pela camada de ozônio, a radiação UV com comprimento de onda entre 200 e 300 nm será fortemente absorvida pela atmosfera e a radiação UV com comprimento de onda entre 300 e 335 nm será levemente absorvida pela atmosfera, sendo a absorção em 250 nm 100 vezes superior que a 320 nm (NOGUEIRA, 2005).

A radiação solar com comprimento de onda correspondente a luz visível é filtrada pelas nuvens, chegando uma pequena parcela à superfície. Esta parcela é menor que a parcela de radiação UV que atinge a superfície.

A medida da radiação solar pode ser feita com o uso de instrumentos solarimétricos. Os instrumentos mais utilizados para essa finalidade são os piranômetros e os piroheliômetros. É importante que se conheçam todos os pormenores do equipamento durante a aquisição de medidas, como: a orientação da superfície coletora, se uma determinada medida foi realizada instantaneamente ou se é o resultado de valores integrados por um período de tempo (irradiância) de horas ou dias ou ainda se a medida se refere à radiação global, direta ou difusa (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

O piranômetro é um equipamento utilizado para a medida de radiação solar total, ou seja, mede o fluxo incidente de radiação solar direta juntamente com o fluxo de radiação solar difusa. Deve ser colocado em uma superfície horizontal de modo que ele possa receber toda a radiação que atinge a Terra em um ângulo equivalente a um hemisfério. Para efetuar somente medidas de radiação difusa, coloca-se uma placa opaca na direção dos raios solares incidentes (ADIR, 1985).

O piroheliômetro é um equipamento utilizado para a medida de radiação solar direta. O seu uso é mais complicado do que o do piranômetro, pois o equipamento necessita de um dispositivo mecânico sincronizado com o movimento da Terra, de modo que o tubo do equipamento fique sempre orientado paralelamente aos raios solares incidentes (ADIR, 1985).

O Brasil apresenta um ótimo índice de incidência da radiação solar, em quase toda sua extensão. Entretanto esses valores variam ao longo do ano, como pode ser observado na Figura 2.11, elaborada por Martins et al. (2005). Os mapas foram obtidos a partir de dados climatológicos e imagens do satélite GOES - 8, para o ano de 2000.

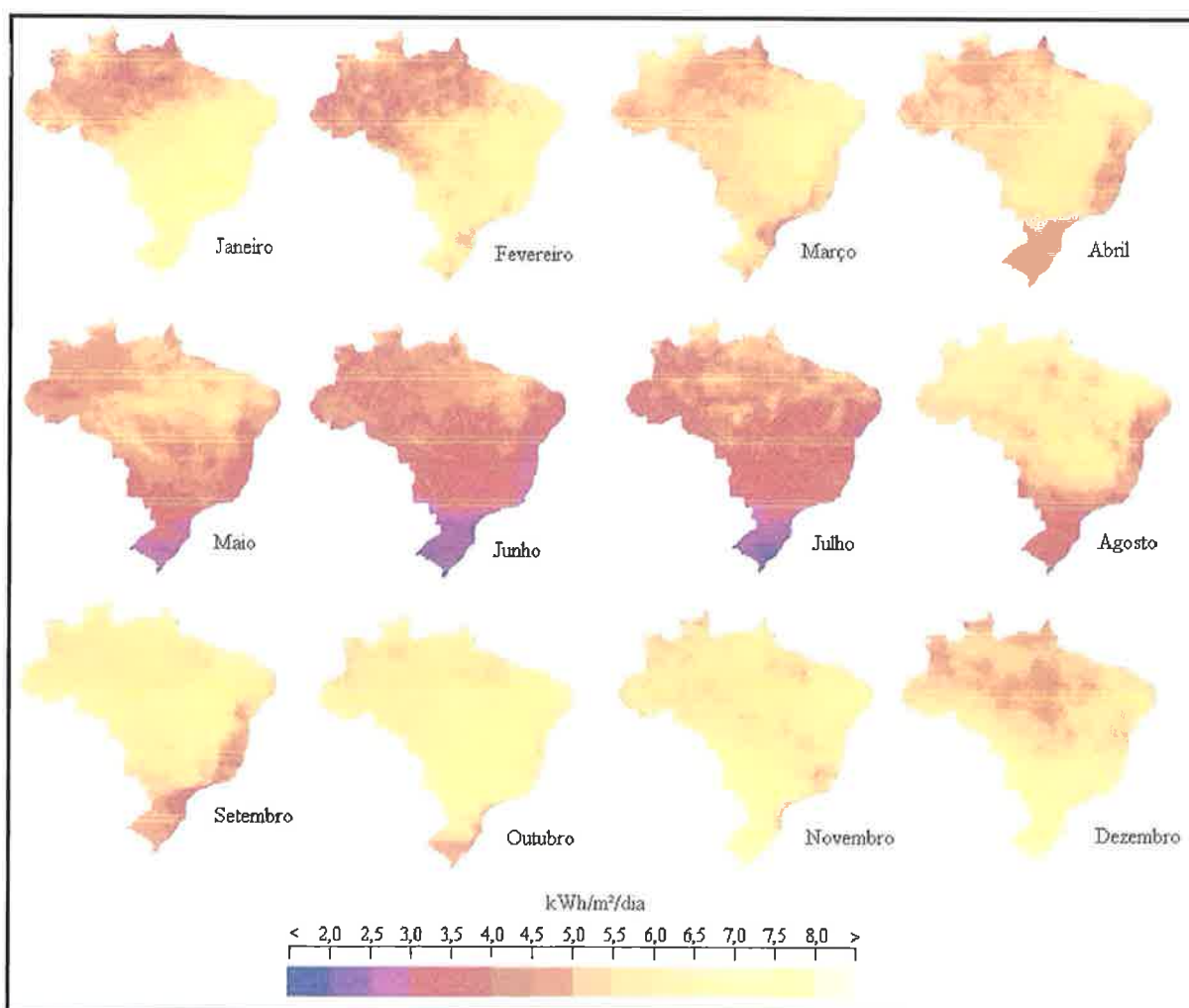


Figura 2.11. Mapas de incidência da média da radiação solar global no Brasil, no ano 2000.

Fonte: Martins et al. (2005).

Os maiores valores de incidência de radiação solar, no Brasil, ocorrem nos meses de outubro, novembro e dezembro, enquanto que os menores valores correspondem aos meses de maio, junho e julho.

Uma comparação do índice de radiação solar incidente no Brasil com índices de radiação solar incidente em outros países pode ser realizada para confirmar os elevados índices de radiação solar incidente no país. Com esse intuito, sabe-se que a França recebe uma radiação solar entre 2,7 kWh/m².dia a 4,2 kWh/m².dia e o Egito recebe entre 6,2 kWh/m².dia a 7,1 kWh/m².dia (ALDABÓ, 2002). Nessa comparação nota-se que os valores de radiação solar incidentes na França e no Egito não variam tanto quanto os valores de radiação solar incidente no Brasil, pois a extensão territorial desses países é bem menor.

O conhecimento da intensidade de radiação solar é fundamental para determinar o desempenho do equipamento. Geralmente os dados de radiação solar são obtidos em uma superfície horizontal e faz-se necessário à estimação da radiação solar no plano inclinado.

2.3.1 Incidência da radiação solar em superfícies inclinadas

Liu e Jordan (1960, apud Rosa, 2003); Hay e Davies (1980, apud Rosa, 2003) e Klucher (1979, apud Rosa, 2003) desenvolveram equações para o cálculo das médias mensais de irradiância no plano inclinado, a partir de dados médios diários de irradiância solar e difusa no plano horizontal.

Modelo proposto por Liu e Jordan (1960 apud Rosa, 2003)

O modelo proposto pelos autores considera a radiação difusa como sendo isotrópica (mesma intensidade em cada ponto do céu) e a equação para obter o valor da irradiância na superfície inclinada é dada pela equação (2.2). Os valores obtidos são expressos em média mensais da irradiância diária incidente num plano inclinado.

$$H_{\beta} = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \Omega \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) H \quad (2.2)$$

Em que: H_{β} é a média mensal da irradiância global diária sobre um plano inclinado ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$); H é a média mensal da irradiância global diária sobre um plano horizontal ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$); H_d é a média mensal da irradiância difusa diária sobre um plano horizontal ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$); R_b é o quociente entre H_{β} e H ; β é a inclinação do coletor solar ($^{\circ}$) e Ω é o índice de refletividade do solo.

Os valores de médias mensais da irradiância solar utilizados neste trabalho são obtidos a partir de valores diários de irradiância solar global e difusa, fornecidos pelo Instituto de Astronomia e Geofísica (I.A.G.), para os anos de 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 e 2004.

O primeiro termo do lado direito da equação (2.2) $\left[H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b \right]$ refere-se à parcela da irradiância direta, o segundo termo $\left[H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right]$ refere-se à irradiância difusa e o terceiro termo $\left[\Omega \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) H \right]$ refere-se à parcela da irradiância solar que é refletida pelo solo. Esta parcela é chamada de albedo.

O índice de refletividade (Ω) presente na equação (2.2) varia de acordo com o tipo de solo em que está instalado o coletor solar. Entretanto o valor de Ω só é significativo em aplicações

onde à inclinação dos coletores está próxima da vertical (90°) e em localidades com latitudes elevadas, pois a neve presente em abundância nessas regiões, apresenta um valor de índice de refletividade do solo de 0,87, refletindo grande parte da radiação incidente.

Os valores de α para diferentes tipos de solo podem ser vistos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Índices de refletividade para diferentes tipos de solo.

Tipos de solo	Refletividade (Ω)
Oceano	0,05
Campo de trigo	0,07
Solo escuro	0,08
Campo verde	0,12-0,25
Arbustos secos	0,20
Concreto envelhecido	0,24
Concreto recente	0,32
Neve envelhecida	0,50
Neve fresca	0,87
Pintura branca	0,80-0,88
Madeira	0,25-0,30
Rocha	0,10-0,45
Pintura cinza	0,35
Placas metálicas	0,65-0,80

Fonte: Monegón, (1980 apud Oliveira, 1997, p. 73).

A variável R_b pode ser calculada com a equação (2.3) para o Hemisfério Norte e com a equação (2.4) para o Hemisfério Sul (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

$$R_b = \frac{H_\beta}{H} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cdot \text{sen} w_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) w_s \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \text{sen} \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} w_o + \left(\frac{\pi}{180}\right) w_o \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta} \quad (2.3)$$

$$R_b = \frac{H_\beta}{H} = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \cdot \text{sen} w_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) w_s \cdot \text{sen}(\phi + \beta) \text{sen} \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} w_o + \left(\frac{\pi}{180}\right) w_o \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta} \quad (2.4)$$

Em que: ϕ é a latitude do local onde está instalado o coletor solar ($^{\circ}$); δ é a declinação do planeta Terra em cada um dos meses do ano ($^{\circ}$); w_s é o ângulo horário do nascer do Sol na superfície inclinada ($^{\circ}$) e w_o é o ângulo horário do nascer do Sol na superfície horizontal ($^{\circ}$).

Essa diferença entre as equações (2.3) e (2.4) ocorre porque o valor de latitude é negativo se a cidade em que está localizado o equipamento solar se apresentar no Hemisfério Sul e positivo se a cidade estiver localizada no Hemisfério Norte.

A ABNT-NBR 10184/1988-a define o ângulo horário do nascer do Sol como: “ângulo diedro com aresta no eixo de rotação da Terra e formado pelo semi-plano que contém o Sol e o semi-plano que contém o meridiano local. Cada hora é igual a 15° de variação, com as manhãs negativas e as tardes positivas”.

Duffie e Beckman (1980) mostram como obter os valores de algumas variáveis que constam na equação do R_b , com o auxílio das seguintes equações:

$$w_o = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (2.5)$$

$$w_s = \min[w_o; \arccos(-\tan(\phi - \beta)\tan\delta)] \text{ (Hemisfério Norte)} \quad (2.6)$$

$$w_s = \min[w_o; \arccos(-\tan(\phi + \beta)\tan\delta)] \text{ (Hemisfério Sul)} \quad (2.7)$$

Os valores de w_o podem ser usados para ambos os Hemisférios sem nenhuma alteração.

Modelo proposto por Hay e Davies (1980 apud Rosa, 2003)

O modelo proposto pelos autores considera a anisotropia da radiação difusa, ou seja, a intensidade da radiação difusa varia em função da quantidade de nuvens no céu, das condições atmosféricas e da região do céu. O autor incorpora um nível de irradiância

diferenciado para a região circunsolar, sendo que o comportamento anisotrópico da irradiância difusa é mais pronunciado em dias claros, com pouca nebulosidade. A equação para obter a radiação na superfície inclinada é dada pela equação (2.8).

$$H_{\beta} = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left[(1 - A_t) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_t R_b \right] + \Omega \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) H \quad (2.8)$$

Em que: A_t é o índice de anisotropia ou índice de transparência atmosférica.

O índice de anisotropia (A_t) pode ser calculado conforme a equação (2.9).

$$A_t = \frac{H_b}{H_o} \quad (2.9)$$

Em que: H_b é a média mensal da irradiância direta diária sobre um plano horizontal (kWh/m².dia) e H_o é a média mensal da radiação extraterrestre diária sobre um plano perpendicular ao feixe de radiação solar (kWh/m².dia).

Modelo proposto por Klucher (1979 apud Rosa, 2003)

O modelo proposto pelo autor também considera a anisotropia da radiação difusa, levando em consideração a irradiância nas proximidades do horizonte em dias claros. A equação para obter a radiação na superfície inclinada, neste caso é dada pela equação (2.10).

$$H_{\beta} = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left[(1 - A_t) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left(1 + f \cdot \text{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) + A_t R_b \right] + \Omega \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) H \quad (2.10)$$

Em que: f é a função de modulação.

A função de modulação pode ser calculada com o auxílio da equação (2.11).

$$f = 1 - \left(\frac{H_d}{H} \right) \quad (2.11)$$

2.3.2 Posição do coletor solar para maximizar a absorção de radiação solar

Palz (1981) ressalta que a absorção da radiação solar na cidade de São Paulo é mais eficiente quando os coletores encontram-se inclinados para os meses de primavera, outono e inverno e na posição horizontal para os meses de verão e por esse motivo os aquecedores de água, que são mais utilizados nos meses de verão, deveriam estar em ângulos próximos da horizontal.

No trabalho apresentado por Tiris e Tiris (1998), os autores apresentam cálculos para verificar qual a melhor inclinação da placa para cada mês do ano na cidade de Gebze (latitude de 40°47'N) - Turquia, objetivando uma máxima absorção da radiação solar. Os autores Hartley et al. (1999), também realizaram cálculos com a mesma finalidade, só que para a cidade de Valência (latitude de 39°30'N) - Espanha.

O procedimento usado por Tiris e Tiris (1998) e também por Hartley et al. (1999) foi baseado no modelo proposto por Liu e Jordan, 1960, descrito no item 2.3.1. Como o grau de refletância é muito pequeno, para regiões em que as latitudes não apresentem valores elevados (regiões polares), os autores não consideram sua influência e a equação (2.2), passa a ser:

$$H_{\beta} = (H - H_d)R_b + H_d \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (2.12)$$

Os autores Tiris e Tiris (1998) e Hartley et al. (1999), utilizaram a equação (2.12) e diversos valores de inclinação da placa plana (variando de 20° até 80°), para verificar qual o valor de inclinação que corresponde ao máximo valor da radiação global absorvida em um plano inclinado, para cada mês do ano.

A Figura 2.12, mostra os valores de inclinação obtidos por Hartley et al. (1999) para a cidade de Valência - Espanha.

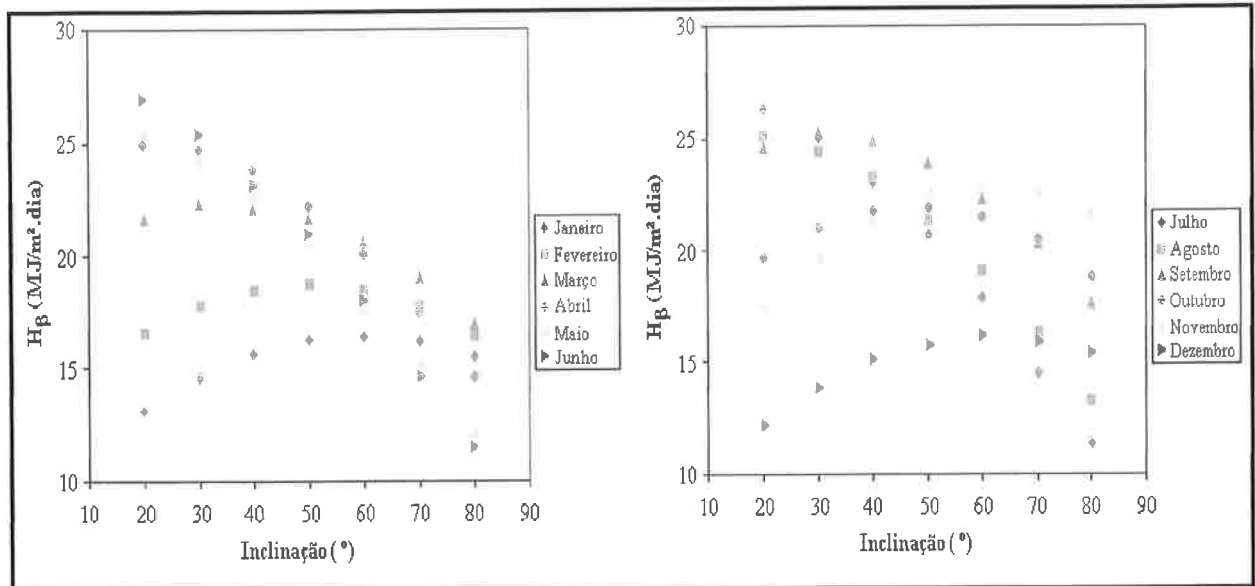


Figura 2.12. Valores de H_β para diferentes valores de inclinação. Fonte: Hartley et al.(1999).

A partir destes gráficos foi realizada uma otimização dos valores do ângulo de inclinação para cada mês do ano. Os valores dos ângulos que ocasionaram uma maior absorção da radiação solar na superfície inclinada, um para cada mês do ano, podem ser visualizados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Melhor inclinação para cada mês do ano.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Inclinação	58,5	49,0	35,0	20,0	4,5	0,0	3,0	14,5	29,0	45,5	60,0	61,0	31,0

Fonte: Hartley et al.(1999).

Hartley et al. (1999) relatam que se o coletor solar não puder ter um dispositivo de ajuste de inclinação e, portanto deva permanecer fixo, a inclinação escolhida deve ser a média anual (31,0° para a cidade de Valência - Espanha), para amenizar as perdas de absorção da radiação solar incidente no coletor, ao longo do ano.

2.4 O coletor solar

O coletor solar é a parte principal do sistema de aquecimento solar. São equipamentos relativamente simples que absorvem e transformam a radiação solar em calor, cedendo-o à substância a ser aquecida (normalmente a água).

Os coletores solares variam no que diz respeito às aplicações e custos. Então, a elaboração do projeto deve analisar todos os pormenores, como: tipo de material utilizado na construção do coletor, temperatura exigida no projeto, presença ou não de uma cobertura de vidro, dentre outros. A temperatura exigida no projeto determina o tipo de coletor solar que deverá ser utilizado, como mostrado na Tabela 2.4 (KALOGIROU, 2003, 2004).

Tabela 2.4. Dados para escolha do coletor solar adequado ao projeto.

Tipo do Coletor	Tipo do Absorvedor	Taxa de Concentração*	Faixa de Temperatura (°C)
Coletor de placa plana (FPC)	Placa	1	30 - 80
Coletor cilíndrico parabólico (PTC)	Tubular	15 - 45	60 - 300
Coletor do tipo disco (PDR)	Ponto	100 - 1000	100 - 500
Coletor com sistema tipo torre (TRC)	Ponto	100 - 1500	150 - 2000

* A taxa de concentração solar é definida como a área de abertura dividida pela área do absorvedor.

Fonte: Kalogirou, 2003, 2004.

A ABNT-NBR 10184/1988-a, define a área de abertura como: “a máxima área projetada do coletor solar através da qual a radiação solar não concentrada é admitida” e a área do absorvedor como: “a área definida pelo perímetro externo da superfície absorvedora”.

Segundo Garcia e Palmisano (2005), a taxa de concentração também pode ser definida como a relação entre o fluxo de radiação que chega ao coletor solar e o fluxo de radiação que chega ao foco.

Os coletores solares podem ser classificados basicamente em dois tipos: o coletor solar plano e o coletor solar de foco ou coletor com concentração de energia. Os coletores planos são mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais, residências, etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes), para a obtenção de água potável a partir de água salobra ou para a concentração de soluções diluídas. Os coletores solares de foco são mais utilizados em aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor.

2.4.1 Coletor solar plano

O coletor solar plano ou simplesmente coletor solar convencional é usado para o aproveitamento direto da energia solar e destaca-se como o tipo de coletor solar mais utilizado.

Bahia (2004) ressalta que atualmente os Estados Unidos têm mais de 1,5 milhões de residências que utilizam a energia solar para aquecimento do ambiente ou de água para banho e piscinas. Momi (2005) cita que Israel tem aquecimento solar em 70% das residências e a maioria dos prédios dispõe de coletores solares, pois a legislação do país determina que todos os edifícios devem ser construídos já com o equipamento ou prevendo sua incorporação.

A forma do coletor plano é em geral retangular, sendo que um dos lados do retângulo deve ser orientado na direção leste-oeste e a face do coletor deve ser voltada para o norte, no caso de países do Hemisfério Sul, como o Brasil (ADIR, 1985; KALOGIROU, 2003).

O aspecto externo de um coletor solar é de uma caixa retangular rasa, geralmente com uma cobertura de vidro e tubos através dos quais circulam o fluido a ser aquecido. Em alguns casos

a circulação deve ser realizada com o auxílio de uma bomba, mas na grande maioria das vezes essa circulação ocorre por convecção natural e pela ação da gravidade em circuitos fechados e neste caso passa a ser chamado de sistema termossifão (ALDABÓ, 2002; ADIR, 1985).

A radiação solar que incide sobre o equipamento, atravessa a placa de vidro e chega à superfície do coletor solar, onde é absorvida. Como a superfície do coletor foi enegrecida, passa a agir como um corpo negro e emite radiação eletromagnética, ocasionando o efeito estufa descrito no item 2.2.2.

A radiação absorvida pela placa é transformada em calor e este é transferido para o interior dos tubos, por onde circula o fluido, aquecendo-o. Os tubos podem ser colocados logo abaixo do coletor solar (como se vê na Figura 2.13) ou serem fixados ao mesmo.

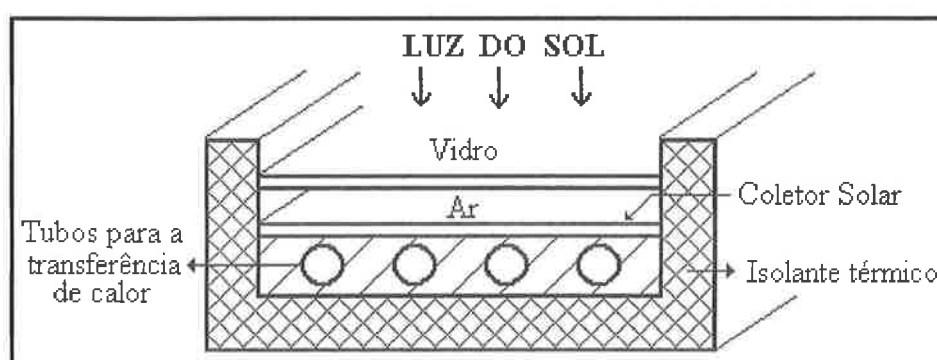


Figura 2.13. Representação de um coletor solar plano básico. Fonte: Palz (1981).

Os coletores planos conseguem captar tanto a radiação difusa quanto à radiação direta. Este fato faz com que os equipamentos que utilizam coletores planos funcionem também em dias nublados, nos quais a intensidade da luz solar direta é praticamente nula (PRADO, 1980). Este fato só ocorre porque os raios infravermelhos e uma pequena quantidade de raios UV atravessam as nuvens, chegando a superfície do coletor e conseqüentemente aquecendo a água, porém com menor intensidade do que em dias sem nebulosidade.

O vidro deve ser usado porque evita que o coletor solar fique em contato direto com o ambiente, reduzindo assim as perdas por convecção e radiação. Ainda visando à redução das perdas, é necessário à colocação de algumas camadas de isolante na parte inferior da placa e nas laterais do equipamento, para evitar a passagem de calor e garantir que todo calor seja utilizado para aquecer o fluido.

A escolha do vidro a ser utilizado deve considerar a quantidade de óxido de ferro, encontrada em sua composição. Geralmente, os vidros nacionais encontrados no comércio apresentam alto teor de óxido de ferro e podem ser identificados pela presença de bordas esverdeadas. Esses vidros absorvem de 5 a 10 % da radiação solar incidente sobre sua superfície, comprometendo sua qualidade ótica. O vidro mais indicado é o de borda branca, pois apresentam somente 0,01 % de óxido de ferro e transmitem aproximadamente 92 % da radiação solar incidente (YOKOYAMA; TANIKADO, 2002).

O vidro com bordas brancas e espessura de 1 a 2 mm, transmite somente a radiação visível (com comprimento de onda entre 0,4 e 0,7 μm) e uma parte da radiação infravermelha, até cerca de 25 μm (ADIR, 1985).

O custo por metro quadrado de um coletor solar plano varia desde 50 até cerca de 800 dólares, dependendo do material que foi utilizado em sua construção (ADIR, 1985).

A temperatura atingida pelo fluido, em um coletor solar plano tradicional é da ordem de 60 a 80 °C, entretanto, usando-se superfícies seletivas e mais de uma camada de vidro é possível obter temperaturas da ordem de 80 a 130 °C (ADIR, 1985). ASHRAE (1996, apud Rosa, 2003) alerta que ocorre uma perda de eficiência em equipamentos que obtêm temperaturas superiores a 71 °C.

Suas principais vantagens são: baixo custo, facilidade de operação/construção/manutenção, redução de perdas ópticas, ampla utilização quando as temperaturas de aquecimento exigidas não ultrapassem 120 °C e utilização tanto da radiação direta quanto da radiação difusa (CÁCERES-VÁSQUEZ; RODRÍGUEZ; FERNANDÉZ-ALBA, 2003).

2.4.2 Coletor solar de foco ou coletor com concentração de energia

Os sistemas de concentração solar são utilizados quando se necessita de temperaturas mais elevadas. Ocorre em equipamentos chamados de concentradores de energia ou coletor solar de foco. Como o próprio nome diz, são coletores que captam a energia solar incidente em uma área relativamente grande e concentra-os em uma área muito menor, chamada de foco, onde se localiza o fluido a ser aquecido.

O foco dos coletores solares pode ser encontrado na forma de um ponto ou de uma linha. Contudo, a necessidade de focalizar a radiação solar sobre o foco exige um mecanismo motorizado de rastreamento do movimento solar, pois a radiação solar deve incidir no refletor com um ângulo correto para ser focalizado sobre o absorvedor, acarretando custos adicionais ao sistema.

Este tipo de coletor solar apresenta algumas desvantagens quando comparados com os coletores planos, a saber:

- Só concentram a radiação solar direta, incidente no equipamento e não podem concentrar a radiação difusa, ou seja, não trabalham em dias nublados;
- Sua complexidade, custo e necessidade de manutenção são elevados;

- Necessidade de mão de obra especializada.

A temperatura atingida pelo fluido, em um coletor solar com concentração de energia, pode chegar à ordem de 2000 °C (BEZERRA, 1998) e os índices de eficiência variam entre 14 % e 22 % de aproveitamento da energia solar incidente (ANEEL, 2007).

O coletor solar do tipo disco (PDR) consta de um espelho parabólico com dimensões entre 7 e 9 m de diâmetro, que concentra todos os raios solares incidentes no equipamento, para um ponto central, chamado de receptor central. O esquema de funcionamento desse equipamento pode ser visto na Figura 2.14 juntamente com a Figura 2.15, que mostra a foto de sistema tipo disco instalado na Plataforma Solar de Almeria (CIEMAT, 2001).

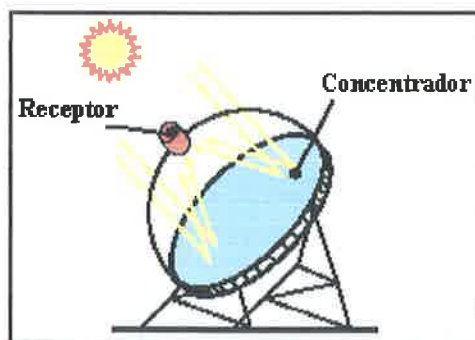


Figura 2.14. Funcionamento de um sistema tipo disco. Fonte: CIEMAT (2001).

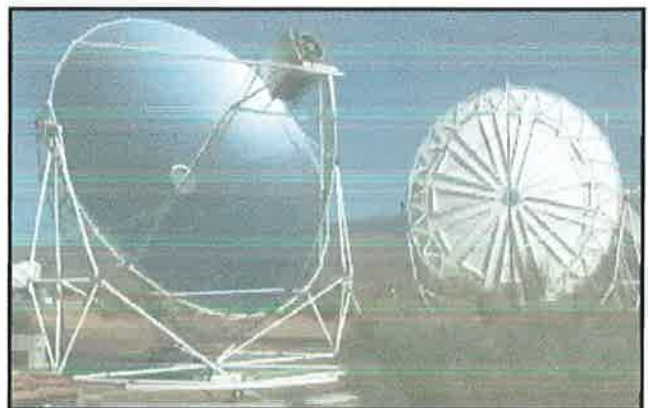


Figura 2.15 Vista frontal e posterior de um coletor solar tipo disco. Fonte: CIEMAT (2001).

Dentro do receptor central a radiação solar é transformada em calor e transferida para o motor Stirling. Esse motor transforma o calor em força motriz, que alimenta um gerador para a produção de eletricidade (dezenas de kW). Sua principal aplicação é a produção de eletricidade em áreas remotas, onde não possuem rede de energia elétrica (CIEMAT, 2001).

Os coletores cilíndricos parabólicos (PTC) são compostos basicamente de um espelho cilíndrico-parabólico que reflete a radiação solar direta, isto é, somente a parcela da radiação solar que incide perpendicularmente na superfície do coletor, concentrando-a sobre um tubo receptor colocado na linha focal da parábola. Esta radiação concentrada é transferida ao fluido que circula pelo interior do tubo, transformando-se assim em energia térmica, em forma de calor sensível.

Um esquema que representa o sistema de funcionamento de um PTC pode ser visualizado na Figura 2.16 juntamente com a Figura 2.17, que mostra a foto de sistema tipo cilíndrico parabólico instalado na Plataforma Solar de Almeria (CIEMAT, 2001).

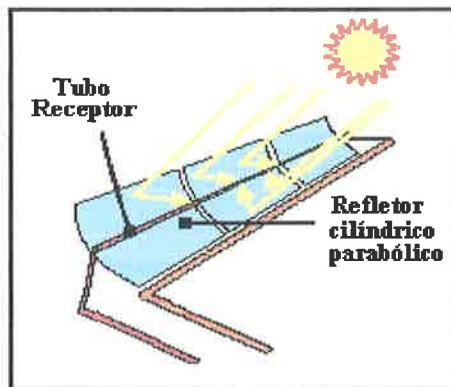


Figura 2.16. Funcionamento de um sistema cilíndrico parabólico. Fonte: CIEMAT (2001).



Figura 2.17 Foto de um sistema cilíndrico parabólico de Almeria. Fonte: CIEMAT (2001).

Estes equipamentos são ideais para trabalhar numa faixa de temperatura de 150 °C a 400 °C, podendo ser acoplados a uma diversidade de processos industriais e podem concentrar a luz solar de 20 a 50 vezes (CIEMAT, 2001).

Um outro tipo de coletor solar com concentração de energia é o sistema de torre ou tecnologia de receptor central (TRC) que emprega os coletores solares (heliostatos) em grande número.

O sistema consta de uma torre cercada por centenas ou milhares de heliostatos que apresentam uma superfície espelhada de grande dimensão. O número de heliostatos que constituem o sistema é aproximadamente igual ao fator de concentração de energia solar, por exemplo, se existem 100 heliostatos pode-se dizer que o sistema concentra 100 vezes a energia solar recebida.

Os heliostatos seguem a posição do Sol em todo momento (elevação ou azimute) e refletem todo feixe de radiação incidente sobre ele, para um mesmo ponto localizado no topo da torre, chamado de foco ou receptor central (PALZ, 1981).

Um esquema do funcionamento deste tipo de sistema pode ser visualizado na Figura 2.18, juntamente com a Figura 2.19, que mostra a foto de um heliostato instalado na Plataforma Solar de Almeria.



Figura 2.18. Funcionamento de um sistema de torre solar.
Fonte: CIEMAT (2001).



Figura 2.19. Foto de um heliostato pertencente ao sistema de torre solar de Almeria. Fonte: CIEMAT (2001).

Na Figura 2.19 vê-se o reflexo de outros heliostatos existentes na plataforma solar e da torre central. Dentro da torre há um alternador acoplado ao sistema e a energia solar é transformada em energia elétrica. Um sistema convencional apresenta valores elevados de investimento

inicial (por volta de 2800 Euros/kW) e da eletricidade obtida (por volta de 0,18 Euros/kWh). Uma redução de custo seria muito importante para ampliar a utilização deste tipo de sistema, que permite trabalhar a altas temperaturas e integrar-se a ciclos mais eficientes, desde ciclos Rankine com vapor d'água superaquecido, até sua integração em ciclos Brayton com turbinas de gás (CIEMAT, 2001).

Um exemplo de utilização do sistema de torre central pode ser visualizado na Figura 2.20. Este sistema encontra-se instalado na Plataforma Solar de Almeria, sendo constituído por 300 heliostatos (de 39,6 m² de superfície cada um) e uma torre central por volta de 80 m (CIEMAT, 2001).

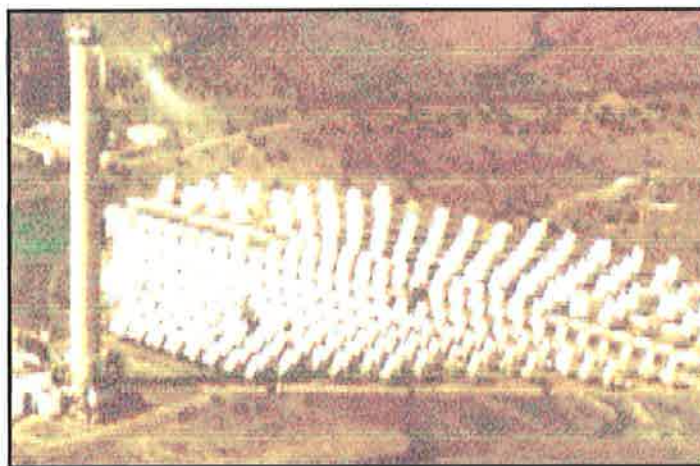


Figura 2.20 Vista aérea de um sistema de torre solar em Almeria. Fonte: CIEMAT (2001).

Para que a eficiência dos coletores solares seja maior, estes equipamentos devem ser sempre voltados para o Equador, ou seja, no hemisfério sul devem ser voltados para o norte enquanto no hemisfério norte devem ser voltados para o sul (PALZ, 1981) e sua inclinação não deve ser fixa ao longo de todo o ano.

Uma comparação entre os detalhes de construção e produtividade de diferentes coletores solares (tipo disco, cilíndrico parabólico e o sistema de torre central) foi realizada por Aldabó, 2002, e pode ser visualizada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Desenvolvimento tecnológico dos diferentes tipos de coletores solares.

	Disco	Cilíndrico parabólico	Torre
Potência produzida	5 - 25 kW	30 - 320 kW	10 - 200 kW
Temperatura de operação (°C)	750	390	565
Eficiência	29,4 %	22 %	23 %
Estado comercial	Protótipo	Disponível	Demonstração
Desenvolvimento tecnológico	Alto	Baixo	Médio
Custo médio em U\$/m ²	1700,00	450,00	335,00
Custo médio em U\$/W	6,90	3,35	3,45

Fonte: Aldabó, 2002.

Um outro fator que merece destaque é o estudo do transporte de calor e massa em coletores solares, pois representam papel importante em muitos problemas industriais e ambientais.

2.5 Transporte de momentum, calor e massa em coletores solares

Alguns estudos publicados vieram ampliar os conhecimentos na área de transporte de momentum, calor e massa em coletores solares de placa plana, dentre os quais se destacam: Mezaache e Dagueuet (2005); Song et al. (1999), Incropera e Witt (1992); Sartori (1996); Bouchekima et al. (2001) e Kalogirou (2004).

Mezaache e Dagueuet (2005) desenvolveram equações para o transporte de momentum, de calor e de massa para o escoamento de um filme de água descendente sobre a superfície de

uma placa plana inclinada, considerando o filme de água e a corrente gasosa em regime laminar.

Song et al. (1999) também desenvolveram as equações para o transporte de momentum, de calor e de massa, mas consideraram a exposição da placa plana à radiação solar e a camada de fluido em regime turbulento. Um esquema do mecanismo proposto pelos autores pode ser visualizado na Figura 2.21. Esse esquema é semelhante ao esquema utilizado neste estudo.

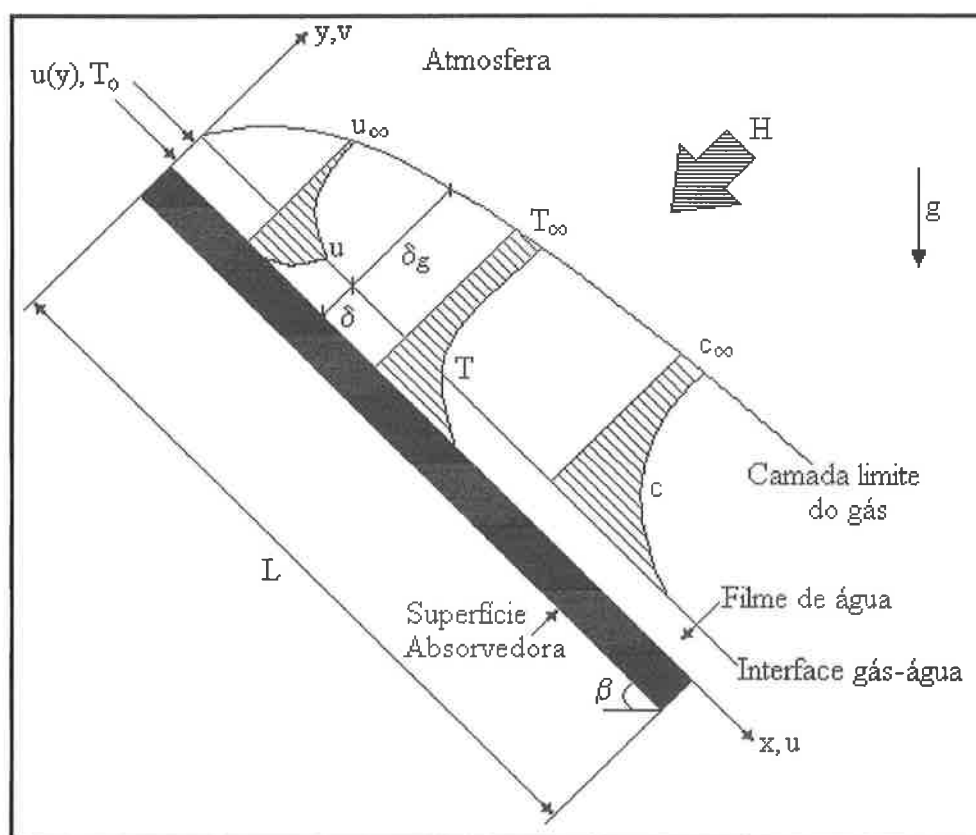


Figura 2.21. Esquema do sistema físico. Fonte: Song et al. (1999).

Incropera e Witt (1992) desenvolveram equações para o transporte de massa, momentum, energia e concentração, tanto para o líquido que escoava sobre a superfície de uma placa plana, quanto para a camada de gás que envolve a placa. Para tanto, as seguintes condições foram impostas: o fluido escoava com vazão constante, em regime permanente e é incompressível; a

espessura do líquido é uniforme ao longo da placa plana; não há dissipação viscosa e nem geração de energia.

Para demonstrar o equacionamento do transporte de massa, os autores partem do princípio da conservação de massa. Esta lei impõe que no escoamento em regime permanente, a quantidade de massa que entra no volume de controle menos a quantidade de massa que sai do volume de controle deve ser nula. Na Figura 2.22, podem ser visualizados um esquema do volume de controle e as taxas de massa na entrada e na saída do volume de controle nas direções x e y.

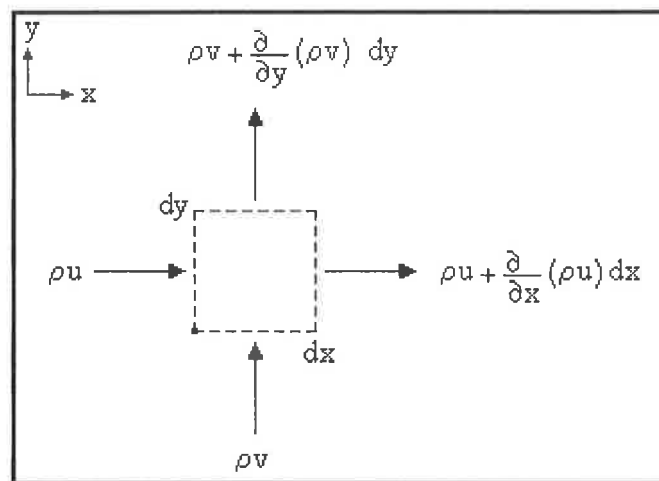


Figura 2.22. Volume de controle infinitesimal (dx , dy , 1) do fluxo de massa na camada limite cinética bidimensional. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

A equação da conservação de massa mostra que:

$$(\rho u)dy + (\rho v)dx - \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy - \left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx = 0 \quad (2.13)$$

Em que: ρ é a massa específica do líquido (kg/m^3); u é a componente da velocidade mássica do líquido na direção x (m/s) e v é a componente da velocidade mássica do líquido na direção y (m/s).

A equação (2.13), também pode ser escrita como:

$$(\rho u)dy + (\rho v)dx - (\rho u)dy - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}dx.dy - (\rho v)dx - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y}dy.dx = 0 \quad (2.14)$$

Simplificando os termos semelhantes e dividindo por $(- dx.dy)$, têm-se:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.15)$$

Como o líquido é considerado incompressível (ρ constante), a equação (2.15) pode ser escrita como:

$$\boxed{\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} = 0} \quad (2.16)$$

A equação (2.16) é a equação do transporte de massa na camada limite cinética bidimensional e também foi obtida por Mezaache e Daguene (2005) e por Song et al. (1999).

Para demonstrar o equacionamento do transporte de momentum, Incropera e Witt (1992), desenvolveram equações baseadas na segunda lei de Newton. Esta lei impõe que a resultante de todas as forças que atuam sobre o volume de controle é igual à taxa líquida de saída de momentum (saída menos entrada do momentum em um volume de controle).

Sobre o fluido atuam dois tipos de forças: as forças volumares e as forças superficiais. As forças volumares são proporcionais ao volume de fluido e são influenciadas pelos campos magnético, gravitacional, centrífugo ou elétrico. Para melhor identificação das forças, as componentes da força volumar por unidade de volume do fluido na direção x e na direção y , foram chamadas de X e Y , respectivamente.

As forças superficiais (F_s) se devem à pressão estática no fluido e as tensões viscosas (força por unidade de área). A tensão viscosa pode ser decomposta em duas componentes perpendiculares: a tensão normal à superfície (σ_{ij}) e a tensão de cisalhamento (τ_{ij}). Nestas

componentes da força, o primeiro índice indica a orientação da superfície, mediante a direção da normal à superfície e o segundo índice indica a direção da componente da força.

Na Figura 2.23 pode ser visualizado um esquema das tensões normais e de cisalhamento que atuam na superfície x e na superfície y.

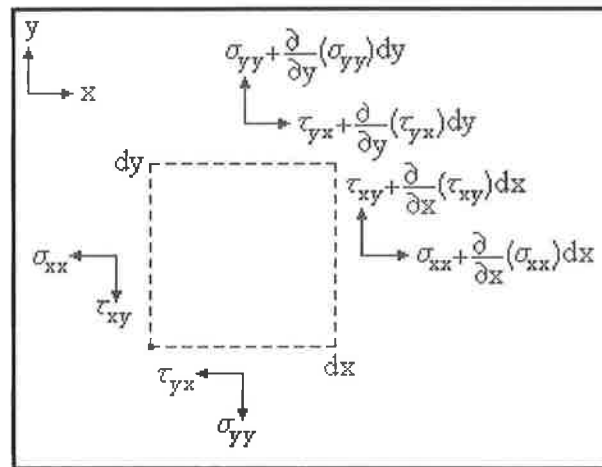


Figura 2.23 Volume de controle infinitesimal (dx, dy, 1) das tensões viscosas normais e de cisalhamento na camada limite cinética bidimensional. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

Cada uma das tensões pode alterar-se continuamente, em cada uma das coordenadas. Com a expansão em série de Taylor para as tensões, a força superficial resultante em cada uma das direções pode ser escrita como:

$$F_{s,x} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial P_\infty}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) dx dy \quad (2.17)$$

$$F_{s,y} = \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial P_\infty}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) dx dy \quad (2.18)$$

Em que: $F_{s,x}$ é a força superficial na direção x (N/m²); σ_{xx} é a tensão superficial normal à superfície da placa (N/m²); P_∞ é a pressão atmosférica (Pa); τ_{yx} é a tensão de

cisalhamento na direção x normal a superfície da placa (N/m^2); $F_{s,y}$ é a força superficial na direção y (N/m^2); σ_{yy} é a tensão superficial sobre a superfície da placa (N/m^2) e τ_{xy} é a tensão de cisalhamento na direção y sobre a superfície da placa (N/m^2).

Incropera e Witt (1992) citam que as tensões superficiais são proporcionais aos gradientes de velocidade e a viscosidade do fluido, obtendo as equações (2.19), (2.20) e (2.21).

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.20)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.21)$$

Em que: μ é a viscosidade dinâmica do líquido (kg/s.m).

As outras componentes da segunda lei de Newton são os fluxos do momentum no volume de controle. A Figura 2.24 mostra o fluxo de momentum na direção x .

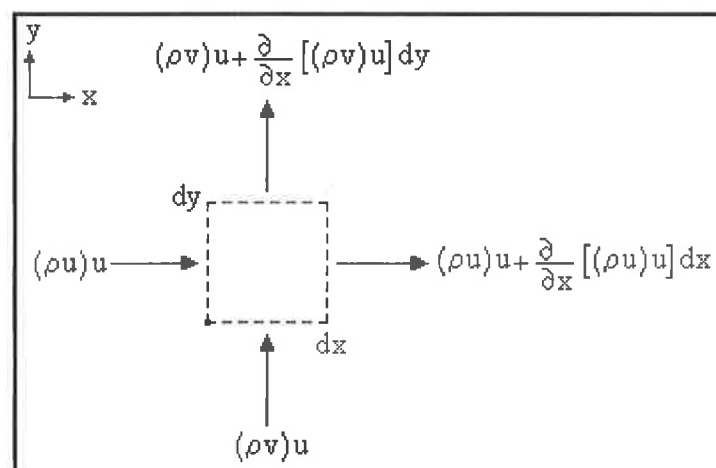


Figura 2.24. Volume de controle infinitesimal (dx , dy , 1) do fluxo de momentum na camada limite cinética bidimensional. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

Ao igualar-se a taxa líquida da saída do momentum x , do volume de controle, com a força superficial resultante na direção x , obtêm-se a equação (2.22).

$$\frac{\partial[(\rho u)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(\rho v)u]}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial P_{\infty}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X \quad (2.22)$$

Em que: X é a componente da força volumar por unidade de volume do fluido na direção x (N/m^3)

Uma equação análoga pode ser obtida na direção y , e encontra-se a seguir:

$$\frac{\partial[(\rho u)v]}{\partial x} + \frac{\partial[(\rho v)v]}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial P_{\infty}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y \quad (2.23)$$

Em que: Y é a componente da força volumar por unidade de volume do fluido na direção y (N/m^3).

Substituindo as equações (2.19), (2.20) e (2.21) nas equações (2.22) e (2.23), obtêm-se as equações do momentum na direção x (2.24) e a equação do momentum na direção y (2.25).

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P_{\infty}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + X \quad (2.24)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P_{\infty}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + Y \quad (2.25)$$

Utilizando as condições impostas inicialmente para a camada de líquido, a equação da continuidade (2.16) e o fato de $\left(\frac{\partial u}{\partial y} \gg \frac{\partial u}{\partial x} \text{ ou } \frac{\partial v}{\partial y} \text{ ou } \frac{\partial v}{\partial x} \right)$, obtêm-se a equação do transporte de

momentum (2.26):

$$\boxed{\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g \sin \beta + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)} \quad (2.26)$$

Em que: g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e β é a inclinação da placa plana ($^{\circ}$).

O primeiro termo do lado direito da equação (2.26) $[g\rho\text{sen}\beta]$ representa o transporte de momentum devido à ação da pressão atmosférica na placa plana inclinada. E o segundo termo do lado direito da equação (2.26) $\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$ representa o transporte de momentum devido à tensão de cisalhamento que atua na placa plana inclinada.

A equação (2.26) também foi obtida por Mezaache e Dagenet (2005).

A equação do transporte de momentum (2.27) obtida por Song et al. (1999), é um pouco diferente, pois os autores consideraram o fluido em regime turbulento.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \rho g \text{sen} \beta + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \frac{\partial u}{\partial y} (v + \varepsilon_m) \right] \quad (2.27)$$

Em que: v é a viscosidade cinemática do líquido (m^2/s) e ε_m é a difusividade da água para o momentum (m^2/s).

O termo que foi acrescentado $\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$ ocorre devido às flutuações turbulentas que o líquido apresenta quando escoar em regime turbulento.

O transporte de energia desenvolvido por Incropera e Witt (1992) considera somente a energia interna térmica (e) e a energia cinética $\left(E_c = \frac{u^2 + v^2}{2} \right)$. Os efeitos da energia potencial que atuam sobre o fluido foram desprezados. O volume de controle juntamente com as taxas de energia devido à condução e convecção na entrada e na saída do volume de controle nas direções x e y , a taxa de energia gerada (\dot{E}_g) e a taxa de trabalho (\dot{W}), podem ser visualizados no esquema apresentado na Figura 2.25.

E a equação da conservação de energia térmica, é:

$$\rho \left(u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - P_\infty \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \Phi + \dot{q} \quad (2.28)$$

Em que: e é a energia interna térmica por unidade de massa (J/kg); k é a condutibilidade térmica molecular do líquido (W/m.K); T é a temperatura do líquido (K); Φ é a função de dissipação viscosa (s^{-2}) e \dot{q} é a taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m³).

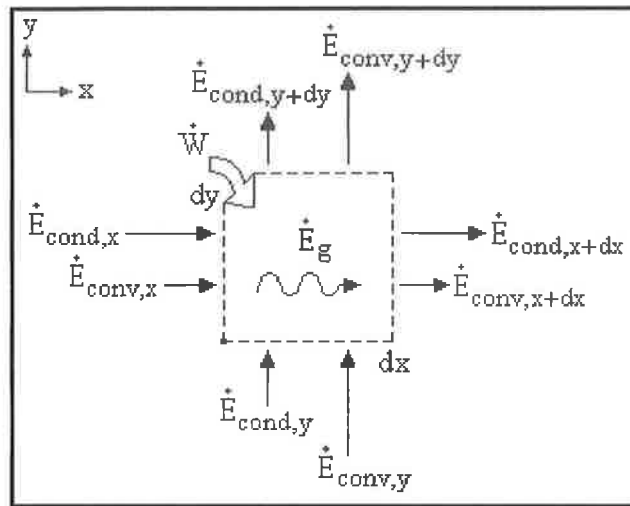


Figura 2.25 Volume de controle infinitesimal (dx , dy , 1) da conservação da energia na camada limite térmica bidimensional. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

Utilizando as condições impostas para a camada de líquido, a equação da continuidade (2.16) e o fato do líquido ser incompressível ($\partial e = c_p \partial T$), obtém-se a equação do transporte de energia (2.29):

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu c_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.29)$$

Em que: c_p é o calor específico do líquido (J/kg.K) e Pr é o número de Prandtl.

A equação (2.29) também foi obtida por Mezaache e Daguenet (2005).

A equação do transporte de energia (2.30) obtida por Song et al. (1999), considerando o fluxo de calor devido às flutuações turbulentas e a absorção de energia solar pelo fluido que escoava sobre a placa plana, pode ser visualizada a seguir.

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(k + \frac{\rho c_p \varepsilon_m}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} (H^+ - H^-) \quad (2.30)$$

Em que: Pr_t é o número de Prandtl do filme de água turbulento; H^+ é o fluxo de radiação em direção a interface líquido-gás (W/m^2) e H^- é o fluxo de radiação em direção da superfície da placa plana (W/m^2).

O termo $\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]$ representa o fluxo de calor devido a condução, o termo $\left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho c_p \varepsilon_m}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]$

é ocasionado pelo fluxo de calor devido as flutuações turbulentas e o segundo termo do lado

direito $\left[\frac{\partial}{\partial y} (H^+ + H^-) \right]$ representa a absorção de radiação solar pelo filme de líquido que esco

sobre a placa plana.

Para o estudo que está sendo desenvolvido o fluxo do líquido que esco sobre a placa plana é considerado laminar e as equações desenvolvidas por Mezaache e Daguene (2005) podem ser aplicadas. Entretanto, faz-se necessário a colocação do termo relativo à absorção da radiação solar pelo filme de líquido, presente na equação desenvolvida por Song et al. (1999). Portanto as equações de transporte de massa (2.31), de momentum (2.32) e de energia (2.33), aplicadas neste estudo, para o filme de líquido em regime laminar, são:

$$\text{massa: } \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.31)$$

$$\text{momentum: } \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = g \cdot \rho \cdot \sin \beta \quad (2.32)$$

$$\text{energia: } \rho \cdot c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (H^+ - H^-) \quad (2.33)$$

Incropera e Witt (1992) desenvolveram equações para o transporte de massa, momentum, energia e concentração, também para a camada de gás que envolve a placa. Para tanto, as

seguintes condições foram impostas: a velocidade da corrente gasosa é tal que pode ser admitida como fluxo laminar; o gás age como gás perfeito; a espessura da camada de gás é pequena, quando comparada com o comprimento da placa; a pressão é uniforme; a superfície do líquido é lisa e os efeitos secundários como dissipação viscosa e geração de energia não são considerados.

Para demonstrar o equacionamento do transporte de massa, na camada gasosa, os autores partem do mesmo princípio utilizado para o fluido: o princípio da conservação de massa em um volume de controle da camada cinética bidimensional. O volume de controle para a camada gasosa pode ser visualizado na Figura 2.26, juntamente com as taxas de massa na entrada e na saída do volume de controle nas direções x e y.

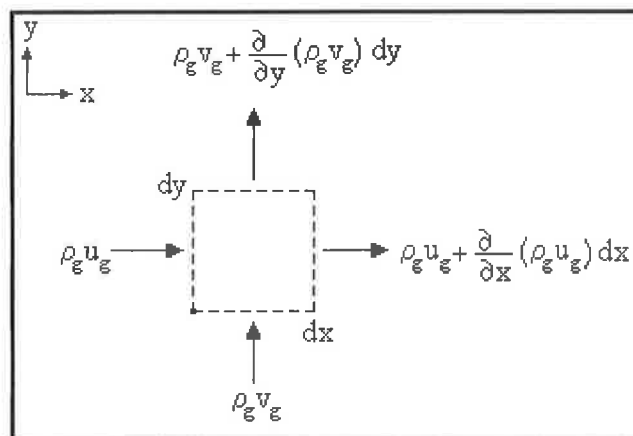


Figura 2.26. Volume de controle infinitesimal (dx , dy , 1) da conservação da massa na camada gasosa. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

A equação do transporte de massa para a corrente gasosa de ar seco e vapor d'água (2.34) pode ser representada da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial y} = 0 \quad (2.34)$$

Em que: ρ_g é a massa específica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água (kg/m^3); u_g é o

componente da velocidade mássica da mistura gasosa na direção x (m/s) e v_g é a componente da velocidade mássica da mistura gasosa na direção y (m/s).

A equação (2.34) também foi obtida por Mezaache e Daguene (2005) e por Song et al. (1999) para o transporte de massa na camada limite cinética bidimensional da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água.

Para demonstrar o equacionamento do transporte de momentum, Incropera e Witt (1992), desenvolveram equações baseadas na segunda lei de Newton, que podem ser aplicadas tanto para fluidos quanto para misturas binárias, que são representadas pelas equações do momentum na direção x (2.24) e a equação do momentum na direção y (2.25). Aplicando-as a mistura gasosa, têm-se:

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P_\infty}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu_g \left[2 \frac{\partial u_g}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_g \left(\frac{\partial u_g}{\partial y} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) \right] + X \quad (2.35)$$

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial v_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P_\infty}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu_g \left[2 \frac{\partial v_g}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_g \left(\frac{\partial u_g}{\partial y} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \right) \right] + Y \quad (2.36)$$

Em que: P_∞ é a pressão atmosférica (Pa); μ_g é a viscosidade dinâmica da mistura gasosa (kg/m.s); X é a componente da força volumar por unidade de volume do fluido na direção x (N/m³) e Y é a componente da força volumar por unidade de volume do fluido na direção y (N/m³).

Utilizando as condições impostas para a camada gasosa, a equação da continuidade (2.16), considerando $\left(\frac{\partial u_g}{\partial y} \gg \frac{\partial u_g}{\partial x} \text{ ou } \frac{\partial v_g}{\partial y} \text{ ou } \frac{\partial v_g}{\partial x} \right)$ e X igual à força de empuxo ($X = \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \beta$)

obtêm-se a equação (2.37) do transporte de momentum na direção x.

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P_\infty}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) + \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \beta \quad (2.37)$$

Utilizando as mesmas condições impostas para a camada gasosa na direção x , o fato de não haver forças volumares na direção y $\left(\frac{\partial P_\infty}{\partial x} = \frac{\partial P_\infty}{\partial y} \right)$ o fato do componente da velocidade da camada gasosa na direção y , não variar nem na direção x e nem na direção y (pois a camada gasosa é uniforme ao redor da placa) $\left(\frac{\partial v_g}{\partial x} = \frac{\partial v_g}{\partial y} = 0 \right)$ e considerando Y igual a força de empuxo na atmosfera ($Y = \rho_\infty \cdot g \cdot \text{sen}\beta$), obtém-se a equação (2.38) do transporte de momentum na direção y .

$$\frac{\partial P_\infty}{\partial y} = \frac{\partial P_\infty}{\partial x} = \rho_\infty \cdot g \cdot \text{sen}\beta \quad (2.38)$$

Em que: g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e ρ_∞ é a massa específica do vapor presente na atmosfera (kg/m^3).

Substituindo a equação (2.38) na equação (2.37), obtém-se a equação do momentum (2.39) na para a camada gasosa.

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) + g(\rho_g - \rho_\infty) \text{sen}\beta \quad (2.39)$$

A equação (2.39) também foi obtida por Song et al. (1999).

Os autores Mezaache e Daguinet (2005), consideraram ($\rho_g = \rho_\infty$) e a equação do transporte de momentum (2.40) apresentada por eles é:

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) \quad (2.40)$$

Incropera e Witt (1992), também desenvolveram equações para o transporte de energia para a camada de gás e neste caso é faz-se necessário a introdução de um termo que ocorre devido à difusão da camada gasosa na direção y , como pode ser visualizado na Figura 2.27, que

representa o fluxo de energia no volume de controle da mistura gasosa.

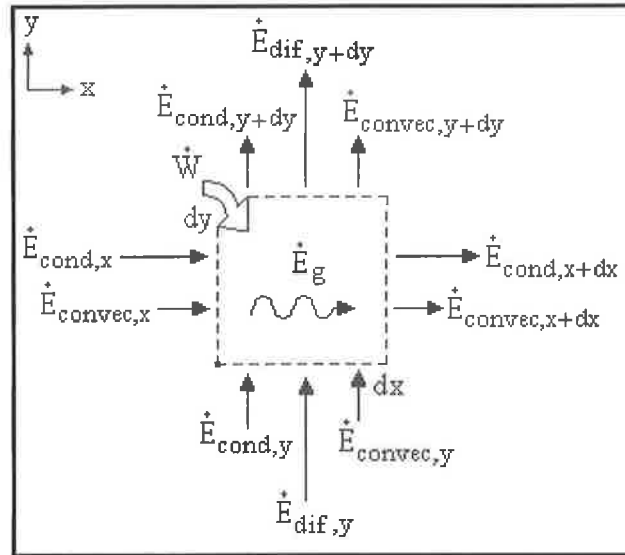


Figura 2.27 Volume de controle infinitesimal (dx, dy, 1) para a conservação da energia na camada gasosa. Fonte: INCROPERA e WITT (1992).

A equação (2.41) representa a conservação de energia na camada gasosa e é representada da seguinte forma:

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial e_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial e_g}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) - P_\infty \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} \right) + D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial (\rho_g e_g)}{\partial y} \right) + \mu_g \Phi + \dot{q} \quad (2.41)$$

Em que: e_g é a energia interna da mistura gasosa, por unidade de massa (J/kg); k_g é a condutibilidade térmica molecular da mistura gasosa (W/m.K); T_g é a temperatura da mistura gasosa (K); D é o coeficiente de difusão (m²/s); Φ é a função de dissipação viscosa (s⁻²) e \dot{q} é a taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m³).

O quarto termo do lado direito da equação $\left[D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial (\rho_g e_g)}{\partial y} \right) \right]$ foi introduzido para considerar a

difusão do vapor d'água proveniente da evaporação do líquido (que escoava sobre a placa

plana), na camada de ar que envolve a placa.

Utilizando as condições impostas para a camada gasosa, a equação da conservação de massa para a camada gasosa (2.34) o fato da temperatura do gás não variar com x , pois a superfície da placa plana é isotérmica $\left(\frac{\partial T_g}{\partial x} = 0\right)$, o fato da mistura gasosa se comportar como gás

perfeito ($\partial e_g = c_{p,g} \partial T_g$) e não ter geração de energia e nem dissipação viscosa, têm-se:

$$\rho_g \left(u_g \frac{\partial(c_{p,g} \cdot T_g)}{\partial x} + v_g \frac{\partial(c_{p,g} \cdot T_g)}{\partial y} \right) = + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + D \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial(\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot T_g)}{\partial y} \right) \quad (2.42)$$

Em que: $c_{p,g}$ é o calor específico para uma mistura de gás binária (J/kg.k); $c_{p,v}$ é o calor específico para o vapor d'água presente em uma mistura de gás binária (J/kg.k) e $c_{p,ar}$ é o calor específico para o ar seco presente em uma mistura de gás binária (J/kg.k).

Considerando:

$$\rho_g = \rho_{ar} + \rho_v = \rho_g \cdot m_{ar} + \rho_g \cdot m_v = \rho_g (m_{ar} + m_v) \quad (2.43)$$

Em que: ρ_g é a massa específica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água (kg/m³); ρ_{ar} é a massa específica do ar seco presente em uma mistura de gás binária (kg/m³); ρ_v é a massa específica do vapor d'água presente em uma mistura de gás binária (kg/m³); m_{ar} é a fração mássica do ar seco presente em uma mistura de gás binária e m_v é a fração mássica do vapor d'água presente em uma mistura de gás binária.

Têm-se:

$$\rho_g c_{p,g} \left(u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + D \cdot c_{p,g} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial(\rho_g (m_{ar} + m_v) T_g)}{\partial y} \right) \quad (2.44)$$

E, a equação de transporte de energia (2.45) para a mistura gasosa, pode ser escrita como:

$$\rho_g c_{p,g} \left(u_g \frac{\partial T_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) = + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right) + D \cdot \rho_g \cdot c_{p,g} \frac{\partial(m_{ar} + m_v)}{\partial y} \frac{\partial T_g}{\partial y} \quad (2.45)$$

O segundo termo do lado direito da equação (2.45) $\left(D \cdot \rho_g \cdot c_{p,g} \frac{\partial(m_{ar} + m_v)}{\partial y} \frac{\partial T_g}{\partial y} \right)$ representa o transporte de energia devido o gradiente de concentração.

E ressalta que o calor específico de uma mistura binária pode ser calculado como:

$$c_{p,g} = c_{p,a} + m_v (c_{p,v} - c_{p,a}) \quad (2.46)$$

Para as condições limites e interfaciais têm-se:

$$x=0: u = u(y); T = T_e; u_g = u_\infty; T_g = T_\infty; m_v = m_{v\infty} \quad (2.47)$$

$$y=0: u = 0; - \left(k + \frac{\rho c_p \epsilon_m}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} = \int_0^{\lambda_c} \alpha_\lambda H_\lambda^+ d\lambda \quad (2.48)$$

$$e y \rightarrow \infty: u_g = u_\infty; T_g = T_\infty; m_v = m_{v\infty} \quad (2.49)$$

Em que: T_e é a temperatura de entrada (K); u_∞ é a velocidade da atmosfera na direção x (m/s);

T_∞ é a temperatura da atmosfera (K); $m_{v\infty}$ é a fração mássica do vapor d'água

presente na atmosfera; λ_c é o comprimento de onda acima do qual a água é opaca

(μm); α_λ é a absorvidade da superfície para o comprimento de onda λ e H_λ^+ é o

fluxo de radiação no início da placa plana com o comprimento de onda λ (W/m^2).

O termo da direita da equação 2.48 $\left(\int_0^{\lambda_c} \alpha_\lambda H_\lambda^+ d\lambda \right)$ ocorre pela absorção da radiação externa pela placa opaca.

As equações (2.50), (2.51), (2.52) e (2.53) representam a continuidade da velocidade, da temperatura, da tensão de cisalhamento e do balanço de energia, respectivamente.

$$u_i = u = u_g \quad (2.50)$$

$$T_i = T = T_g \quad (2.51)$$

$$\left[(\mu - \rho \epsilon_m) \frac{\partial u}{\partial y} \right]_i = \left[\mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right]_i \quad (2.52)$$

$$e \int_{\lambda_c}^{\lambda_c} \alpha \lambda H^{\lambda} d\lambda - \left[k + \frac{\rho c \epsilon_m}{Pr_t} \right] \frac{\partial T}{\partial y} = h_{fg} m - \left[k_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right]_i \quad (2.53)$$

Em que: u_i é a velocidade da interface gás/água na direção x (m/s); T_i é a temperatura da interface gás/água (K) e m é o fluxo de massa interfacial (kg/sm²).

O fluxo de massa do filme de água para a camada de gás (m):

$$m = \rho_{i,g} V_i \quad (2.54)$$

Em que: $\rho_{i,g}$ é a massa específica da mistura gasosa de ar seco e vapor d'água na interface gás/água (kg/m³) e V_i é a velocidade da interface gás/água na direção y (m/s).

Por considerar a solubilidade do ar no filme de água negligenciável, a velocidade transversal da mistura de ar-vapor na interface (V_i) pode ser expressa por:

$$V_i = - \left(\frac{D}{\rho m_v} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_i \quad (2.55)$$

A fração mássica do vapor d'água na interface pode ser determinada por:

$$m_i = \frac{\rho_{i,v} (P_{\infty} - p_{i,v}) \left(\frac{M_a}{M_a + p_{i,v}} \right)}{p_{i,v}} \quad (2.56)$$

Em que: m_i é a fração mássica do vapor d'água na interface; $p_{i,v}$ é a pressão de saturação na interface gás-água (Pa); P_{∞} é a pressão atmosférica (Pa); M_a é a massa molar do ar

seco e M_v é a massa molar do vapor.

A pressão de saturação na interface gás-água pode ser estimada pela correlação de Antoine, como se segue:

$$p_{i,v} = 133,32 \exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{T_i - 46,13}\right) \quad (2.57)$$

Fica como sugestão para trabalhos futuros a resolução dessas equações.

2.5.1 Transporte de calor e massa em concentradores e dessalinizadores solares

Sartori (1996) realizou experimentos (em ambiente aberto) na cidade de João Pessoa – Brasil, com um evaporador solar e um dessalinizador solar, ambos com a superfície do coletor com $1,09\text{m}^2$ ($1,00\text{ m} \times 1,09\text{ m}$). O evaporador solar consta de um coletor tipo placa plana (onde escoo o líquido), sem cobertura de vidro que será exposto à radiação solar. E o dessalinizador solar consta do mesmo tipo de coletor, colocado na posição horizontal e coberto com vidro (onde a água evaporada se condensa). Para ambos equipamentos, os autores consideraram as seguintes hipóteses: o sistema está em regime permanente, as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis, a temperatura da superfície do coletor solar é uniforme, o fluido é incompressível, o ar em volta da placa plana pode ser considerado gás perfeito e as propriedades do ar são constantes.

A Figura 2.28 mostra o esquema de transporte de calor que ocorre em um evaporador solar, segundo Sartori (1996). A partir desse esquema o autor desenvolveu as equações de transporte de calor e massa no regime transiente para o evaporador solar.

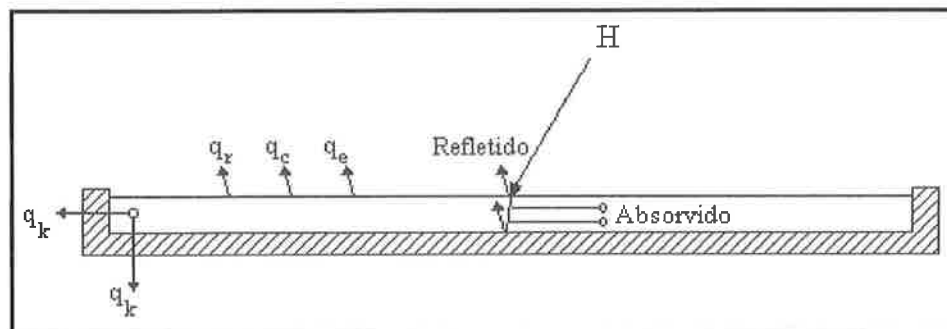


Figura 2.28. Esquema do balanço de energia para um evaporador solar. Fonte: Sartori (1996).

Segundo Duffie e Beckman (1980), o balanço energético do evaporador solar requer que a parcela da energia solar absorvida seja igual à energia transferida por radiação, convecção, evaporação, mais as perdas pelo fundo e pelas bordas do evaporador (por condução), mais a energia gerada pelo sistema. Como a parcela da energia refletida pela água é muito pequena, pode ser desconsiderada.

$$\alpha_a H = q_r + q_c + q_k + q_e + C_{ev} \left(\frac{dt_a}{d\theta} \right) \quad (2.58)$$

Em que: α_a é a absorptância solar da água; H é a média mensal da irradiância global diária, sobre um plano horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$); q_r é a taxa de transporte de calor por radiação (W/m^2); q_c é a taxa de transporte de calor por convecção (W/m^2); q_k é a taxa de transporte de calor por condução (W/m^2); q_e é a taxa de transporte de calor por evaporação (W/m^2); C_{ev} é a capacidade térmica do evaporador ($\text{kJ}/\text{m}^2 \text{K}$); t_a é a temperatura da água (K) e θ é o tempo (s).

A absorptância ou coeficiente de absorção de uma substância pode ser determinada pela equação (2.59), desenvolvida por Incropera e Witt (1992) e seu valor é de $0 \leq \alpha_a \leq 1$. O valor de α_a determina a parcela da média mensal da irradiância global diária que é absorvida pela água, que escoar sobre a superfície da placa. Esta parcela absorvida, também pode ser

representada por $\left[\frac{\partial}{\partial y} (H^+ + H^-) \right]$ segundo os autores Song et al. (1999).

$$H_{\text{abs}} = \alpha_a \cdot H \quad (2.59)$$

Em que: H_{abs} é a irradiância absorvida pelo líquido (kWh/m².dia); H é a média mensal da irradiância global diária sobre um plano horizontal (kWh/m².dia) e α_a é a absorptância solar da água.

Segundo Duffie e Beckman (1980) o termo C_{ev} pode ser definido como mostrado na equação (2.60).

$$C_{\text{ev}} = \frac{W_i \cdot c_p}{D} \quad (2.60)$$

Em que: W_i é a vazão mássica do líquido na entrada da placa (kg/s); c_p é o calor específico do líquido (J/kg.K) e D é o coeficiente de difusão (m²/s).

Dunkle (1961, apud Sartori, 1996) define as taxas de transporte de calor por radiação (q_r), convecção (q_c), condução (q_k) e evaporação (q_e) como visto nas equações (2.61), (2.62), (2.63) e (2.64).

$$q_r = \epsilon_a \sigma \left[(t_a + 273)^4 - (t_{\text{sky}} + 273)^4 \right] \quad (2.61)$$

$$q_c = 39.183 \times 10^{-1} V^{0.5} (t_a - t_{\infty}) \quad (2.62)$$

$$q_k = k(t_a - t_{\infty}) \quad (2.63)$$

$$q_e = 26.639 \times 10^{-1} V^{0.5} (p_a - p_o) h_w / P_{\infty} \quad (2.64)$$

Em que: ϵ_a é a emitância da água; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴); t_a é a temperatura da água (°C); t_{sky} é a temperatura do espaço (°C); V é a velocidade do vento (m/s); t_{∞} é a temperatura atmosférica (°C), k é a condutibilidade

térmica ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$); p_a é a pressão de vapor de água na temperatura da água (Pa); p_o é a pressão de vapor de água na temperatura de orvalho do ar (Pa); h_w é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg) e P_∞ é a pressão atmosférica (Pa).

A obtenção das equações (2.62) e (2.64), pode ser visualizada no Anexo I, explicando o surgimento dos coeficientes numéricos presentes nas equações.

Sartori (1996) considerou que na interface líquido/gás somente a água muda de fase e que a equação (2.64), pode ser entendida como:

- a) Nas primeiras horas do dia, o valor da radiação solar começa a aumentar, gerando um aumento na t_a . Mesmo com esse aumento, seu valor ainda é inferior ao valor da t_o e o valor de p_o torna-se maior que o valor de p_a , gerando uma condensação do vapor sobre a superfície da placa plana, ou seja, ocorre uma condensação (“evaporação negativa”)
- b) Quando $t_a = t_o$ a evaporação torna-se nula, ou seja, a condensação cessa. Neste caso, a taxa de evaporação também é nula.
- c) Como o valor de t_a continua se elevando, gera um aumento do valor de p_a . Isso requer a evaporação de uma maior quantidade de massa de água, para manter o equilíbrio na interface, elevando, assim, o valor da taxa de evaporação.
- d) Quando o valor de radiação solar incidente começa a diminuir, no final da tarde, gera uma diminuição de t_a e uma conseqüente diminuição de temperatura, gerando decréscimo no valor de p_a .
- e) Esse processo ocorre até que a t_a apresente valores inferiores ao da t_o , no início do dia seguinte.

Em que: t_o é a temperatura de orvalho do ar ambiente ($^\circ\text{C}$).

Diversas relações podem ser propostas para obter a temperatura do espaço. Uma delas pode

ser visualizada na equação (2.65).

$$T_{\text{sky}} = T_{\infty} \left[0.8 + \frac{T_o - 273.15}{250} \right]^{1/4} \quad (2.65)$$

Em que: T_o é a temperatura de orvalho do ar ambiente (K).

A taxa de evaporação (\dot{m}) pode ser calculada com o uso da equação (2.66).

$$\dot{m} = \int_0^{\theta} q_e d\theta / h_w \quad (2.66)$$

Em que: \dot{m} é a taxa de evaporação (kg/s).

Sartori (1996), também realizou um balanço de energia no regime transiente para um dessalinizador solar, esquematizado na Figura 2.29, desenvolvendo as equações de transporte de calor para esse equipamento, baseado nesse esquema, que podem ser visualizadas a seguir.

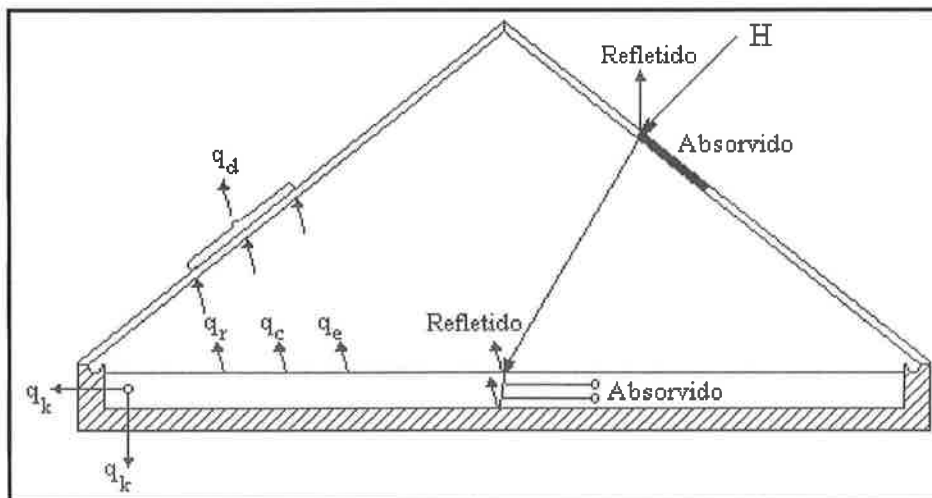


Figura 2.29. Esquema do balanço de energia para um dessalinizador solar. Fonte: Sartori (1996).

De toda a radiação incidente no dessalinizador apenas 32 % será utilizada para aquecer o fluido, do restante da radiação 10 % é refletida pelo vidro, 7 % é absorvida pelo vidro, 10,2 % são perdas por convecção do vidro para o ambiente, 4 % refletido pela superfície do filme, 5

% é transportado por radiação da água para o vidro, 6 % por convecção, 19 % por evaporação e 6,8 % são as perdas através da parede do destilador e do isolamento térmico (BEZERRA, 1998).

Segundo Duffie e Beckman (1980), o balanço energético do destilador solar requer que o total da energia solar absorvida seja igual à energia transferida da cobertura, mais as perdas pelo fundo e pelas bordas do destilador, mais a energia armazenada dentro do sistema.

$$\alpha_{vv} \cdot H + \alpha_a \cdot \tau_{vv} \cdot H = q_d \cdot A + q_k + C_{st} \cdot \left(\frac{dt_a}{d\theta} \right) \quad (2.67)$$

Em que: α_{vv} é a absorptância solar do vidro; τ_{vv} é a transmitância do vidro; q_d é a dissipação de calor do vidro para a vizinhança (W/m^2); A é a área do coletor solar (m^2); C_{st} é a capacidade térmica do dessalinizador (kJ/m^2K).

A dissipação de energia do vidro para a vizinhança é a soma de cada quantidade de energia solar absorvida pelo vidro, ou seja, é a soma das taxas de transporte de calor por evaporação (q_e), convecção (q_c) e radiação (q_r) como na equação (2.68).

$$q_d \cdot A = q_e + q_c + q_r + \alpha_{vv} H \quad (2.68)$$

A parcela ($\alpha_{vv} \cdot H$) representa a parcela de energia solar que foi absorvida pelo vidro.

As parcelas de transporte de calor por evaporação (q_e), convecção (q_c) e radiação (q_r) foram descritas por Dunkle (1961, apud Sartori, 1996), pelas correlações (2.69), (2.70) e (2.71), em que os valores dos variáveis são expressos em Unidades do Sistema Internacional.

$$q_e = 60.78 \times 10^{-7} [t_a - t_{vv} + (p_a - p_{vv} / 267.7 \times 10^3 - p_a) \times (t_a + 273.15)]^{1/3} (p_a - p_{vv}) h_w \quad (2.69)$$

$$q_c = 0.884 [t_a - t_{vv} + (p_a - p_{vv} / 267.7 \times 10^3 - p_a) \times (t_a + 273.15)]^{1/3} (t_a - t_{vv}) \quad (2.70)$$

$$q_r = 0,9\sigma [(t_a + 273.15)^4 - (t_{vv} + 273,15)^4] \quad (2.71)$$

Em que: t_{vv} é a temperatura do vidro ($^{\circ}\text{C}$) e p_{vv} é a pressão de vapor de água na temperatura do vidro (Pa).

A dissipação de energia do vidro para a vizinhança também pode ser determinada pela equação (2.72).

$$q_d = \varepsilon_{vv} \sigma \left[(t_{vv} + 273.15)^4 - (t_{sky} + 273.15)^4 \right] + h_{va} (T_{vv} - T_a) \quad (2.72)$$

Em que: ε_{vv} é a emitância do vidro e h_{va} é a coeficiente de transferência de calor do vidro para o ar ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$).

A equação para o cálculo da taxa transporte de calor por condução (q_k) pode ser calculada como na equação (2.62).

A taxa de evaporação para o dessalinizador solar, pode ser calculada com o auxílio da equação (2.73).

$$\dot{m} = \eta_c / A \int_0^{\theta} q_e d\theta / h_w \quad (2.73)$$

Em que: η_c é a eficiência que leva em conta que nem toda água condensada é coletada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentou inicialmente uma descrição detalhada do equipamento desenvolvido e construído para este estudo, assim como as etapas da metodologia que foi seguida na realização dos experimentos, com e sem pré-aquecimento da alimentação. Posteriormente, foram apresentados os ensaios preliminares, cujo intuito foi confirmar a eficácia do equipamento e verificar quais as variáveis que possivelmente influenciavam a taxa de evaporação. Após os testes preliminares, foi desenvolvido um planejamento fatorial (2^2) para verificar experimentalmente se as duas variáveis escolhidas eram significativamente influentes na taxa de evaporação. Uma vez constatada a influência das variáveis escolhidas, foi estabelecido dois procedimentos experimentais, para quantificar essa influência e confirmar a importância do ajuste da placa plana, mensalmente. Paralelamente à parte experimental, foram desenvolvidas equações de transporte de momentum, calor e massa, para este estudo. E por fim, foi apresentada a metodologia de interpretação dos resultados obtidos experimentalmente e do tratamento dos dados de irradiância solar provenientes do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP).

3.1 Descrição do equipamento utilizado neste estudo

Foram desenvolvidos e construídos dois sistemas de concentração solar. Em ambos, o coletor solar manteve sua superfície sempre voltada para o norte e inclinação variável, podendo ser ajustada sempre que necessário. No primeiro sistema a solução a ser concentrada, encontrava-se em temperatura ambiente, enquanto que no segundo sistema foi introduzido um trocador de

calor para pré-aquecer a solução, utilizada como alimentação, reaproveitando o calor da solução concentrada, coletada na saída do coletor solar.

O esquema do equipamento utilizado no primeiro sistema pode ser visualizado na Figura 3.1. Este equipamento consta de: coletor solar tipo placa plana (1), com promotor de película aderido à superfície do coletor (2), distribuidor de líquidos (3), coletor de concentrados (4) e acessórios. Na Figura 3.2 pode ser visualizada uma foto deste equipamento, durante a realização de um dos experimentos.

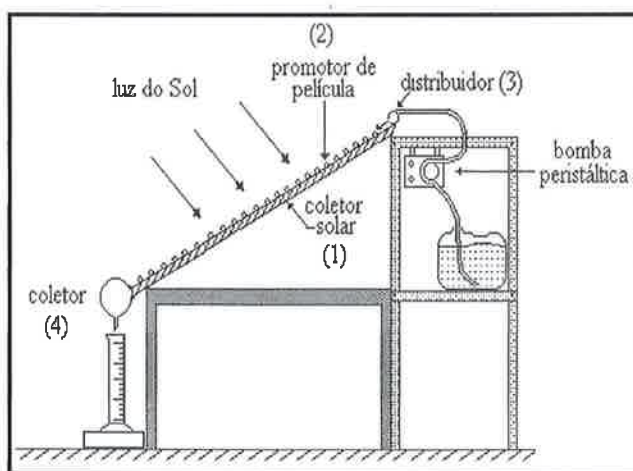


Figura 3.1. Esquema do equipamento.



Figura 3.2. Foto do equipamento.

O segundo sistema de concentração solar apresentou um equipamento idêntico ao primeiro sistema, apenas com a adição de um trocador de calor, que tem por finalidade pré-aquecer a alimentação. A Figura 3.3 mostra o esquema do equipamento com o trocador de calor, juntamente com a Figura 3.4 que mostra uma foto do equipamento, durante a realização de um dos experimentos com pré-aquecimento da alimentação.

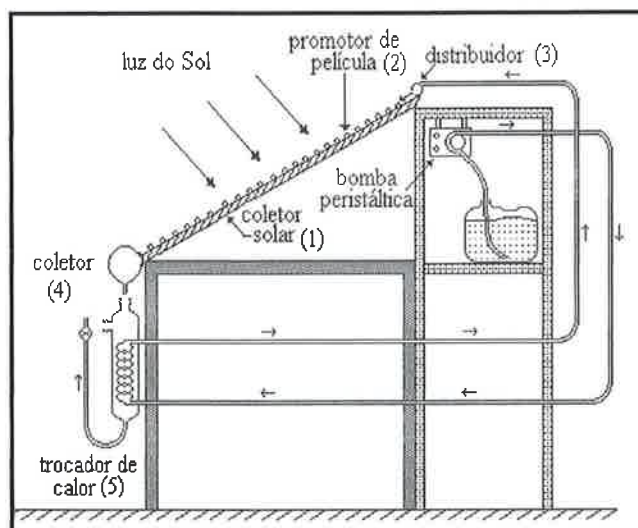


Figura 3.3. Esquema do equipamento com pré-aquecimento.



Figura 3.4. Foto do equipamento com pré-aquecimento.

Os coletores planos utilizados na evaporação solar, geralmente apresentam-se no formato retangular, sendo o comprimento do ramo ascendente duas vezes maior que o comprimento do ramo horizontal e com a dimensão de 1 m^2 , aproximadamente (HONGFEI, 2001; BOUCHEKIMA et al., 2001; SARTORI, 1996). Quando se necessita de uma área maior para troca térmica, utilizam-se vários coletores com 1 m^2 , até que se atinja a área requerida no projeto.

Com base nesta recomendação, o coletor solar utilizado neste estudo mediu $150 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$. Portanto, têm-se $1,05 \text{ m}^2$ de área disponível para a coleta de radiação solar.

A placa plana foi feita de madeira, impermeabilizada (com neutrol) e pintada com tinta preta fosca, para aumentar a absorção da radiação solar que incida sobre ela. A madeira foi o material escolhido, pois apresenta preço acessível, fácil aquisição em qualquer localização do país e baixa condutibilidade térmica.

Inicialmente, o fluido de processo encontrava-se em um recipiente armazenador, de onde foi succionado e introduzido no distribuidor de líquidos. Para que isso ocorresse, foi necessária à

utilização de uma bomba peristáltica, que pode ser visualizada na Figura 3.5. Essa bomba apresenta ajuste manual de vazão, atingindo o seu máximo com a vazão de 4,5 g/s.



Figura 3.5. Foto da bomba peristáltica.

O fluido que sai do recipiente armazenador foi introduzido na região central do distribuidor de líquidos e espalhou-se pelo seu interior. Esse dispositivo manteve suas extremidades fechadas e o fluido teve que sair através dos 9 pequenos orifícios (distantes de 7,5 cm um do outro), presentes no distribuidor. Ao sair dos orifícios, o fluido espalhou-se sobre a placa, produzindo um filme descendente e uniforme sobre toda superfície. O intuito principal dos pequenos orifícios foi garantir uma melhor distribuição do fluido em toda largura da placa. Uma foto do distribuidor de líquido utilizado neste estudo pode ser visualizada na Figura 3.6.



Figura 3.6. Foto do distribuidor de líquidos.

Para coletar o líquido concentrado foi colocado um dispositivo no final da placa plana, de modo que todo o líquido que ainda escoasse sobre sua superfície, fosse derramado para o interior do coletor. As duas extremidades do coletor de concentrado foram fechadas e para o concentrado sair foi instalado um tubo de vidro de 10 cm em sua região central, para efetuar a drenagem do líquido. Uma foto deste acessório pode ser vista na Figura 3.7.

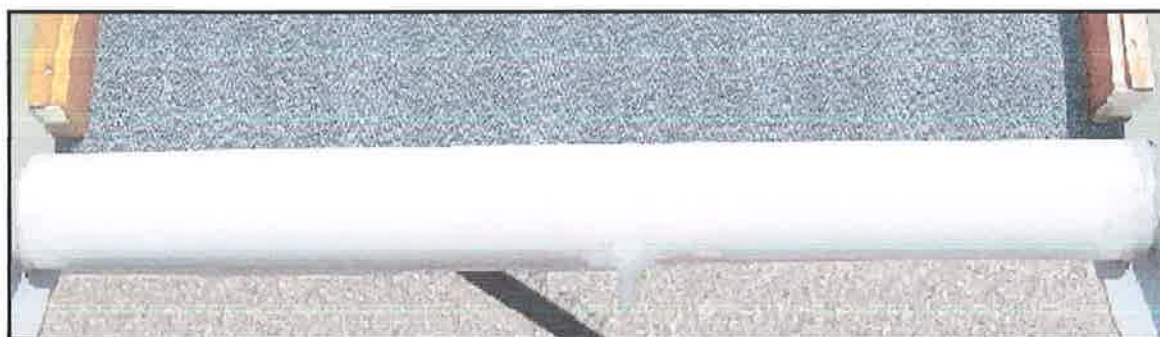


Figura 3.7. Foto do coletor de concentrado.

O líquido concentrado foi armazenado, para posterior destinação final ou utilização. Algumas aplicações desse concentrado foram relatadas no item 2.2. desse trabalho.

Para melhorar o espalhamento do líquido sobre a placa plana e garantir que a camada de líquido fosse uniforme ao longo de toda superfície, foi fixado sobre a mesma o promotor de película.

O promotor de película consistiu de uma malha colocada justaposta à superfície do coletor solar, mantendo com ela o maior contato possível, como pode ser visualizado na Figura 3.8. Este dispositivo visou o aumento da área de evaporação, evitando a quebra do filme descendente em caminhos preferenciais e consequentemente o aumento da eficiência dos evaporadores de filme descendente (SALVAGNINI; TAQUEDA, 2004).

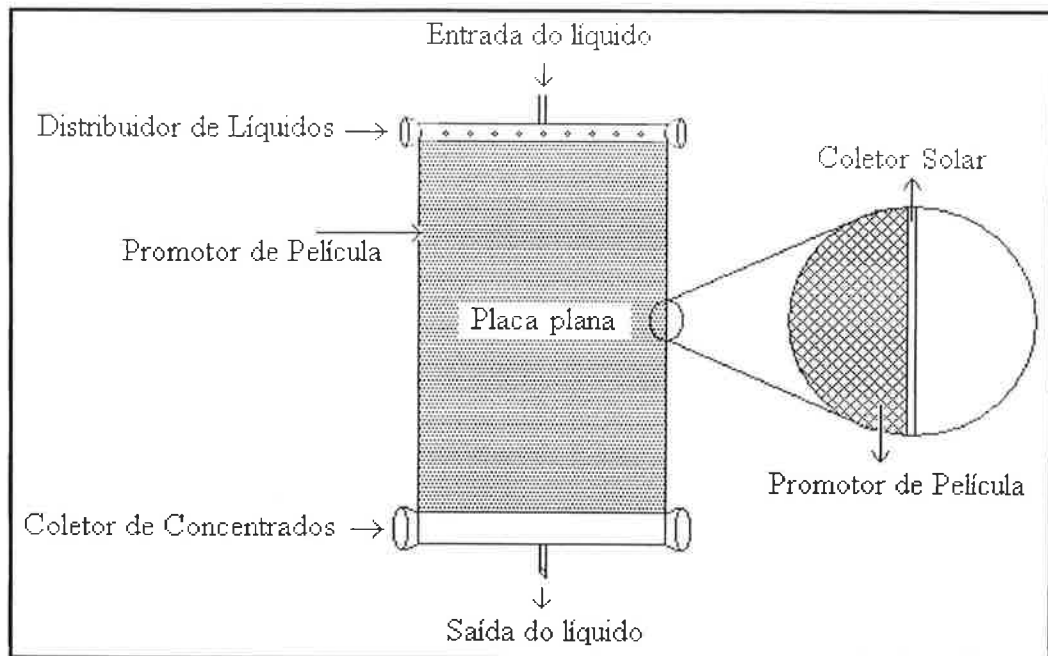


Figura 3.8. Esquema da placa plana com o promotor de película aderido.

Alguns trabalhos (CARRADORI, 2005; MARTINI, 2004; SOUZA, 2003; MORA BEJARANO, 2003; MARTINI, 2000; RIGHI, 1999; JOSÉ, 1998) utilizaram o promotor de película em evaporadores de filme descendente. Esses autores mostraram que o promotor apresentou uma grande eficácia, elevando a taxa de evaporação sempre que utilizado, seja em escala de laboratório ou em escala piloto.

O promotor de película utilizado neste trabalho consistiu de uma malha de polipropileno com abertura de 15 mesh. Como o polipropileno dilata quando aquecido, a colocação do promotor foi realizada tensionando-se a malha, sob a ação de calor. Esse procedimento teve o intuito de evitar que o promotor dilatasse quando exposto ao Sol, formando regiões sem perfeita aderência (“bolhas”), que impeçam o escoamento e espalhamento uniforme do líquido sobre a superfície da placa.

No início de cada experimento foi necessário garantir mecanicamente (com o auxílio das mãos) a molhabilidade de toda superfície da placa. A Figura 3.9 mostra a placa plana logo no

início do experimento, onde se observa a quebra do filme descendente, escoando sobre o promotor. A Figura 3.10 mostra a placa plana após o espalhamento mecânico com as mãos, onde nota-se que o filme de líquido formou uma camada uniforme sobre a superfície da placa. Estas figuras confirmam a necessidade do espalhamento mecânico, para elevar a eficiência do coletor solar.



Figura 3.9. Foto da placa plana no início de um dos experimentos.



Figura 3.10. Foto da placa plana após a molhabilidade mecânica.

3.2 Metodologia experimental

Todos os experimentos foram realizados em ambiente aberto, na cobertura do prédio semi-industrial do departamento de Engenharia Química da Universidade de São Paulo, sendo influenciados pelas variações ambientais.

A realização dos experimentos foi em dias de sol pleno (sem nuvens), pois em dias nublados a taxa de evaporação foi menor que em dias sem nebulosidade, em decorrência da elevação da irradiância difusa. O objetivo de realizar todos os experimentos em dias parecidos foi manter a quantidade de radiação solar incidente o mais similar possível, em todos os dias que se

realizaram os experimentos, atenuando os efeitos da diferença de incidência da radiação solar.

A realização de experimentos em dias chuvosos não foi possível, pois como dito anteriormente os ensaios foram realizados em ambiente aberto.

Vale a pena ressaltar que a série de experimentos desconsiderou o horário de verão, que ocorreu em alguns meses do ano na cidade de São Paulo.

Todos os experimentos foram realizados de forma contínua das 9:00 as 16:00 horas, para verificar como o equipamento se comportava no decorrer de todo o dia.

As medições dos dados experimentais, tais como: temperatura ambiente, umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura do fluido (na entrada e na saída da placa) e vazão mássica do fluido (na entrada e na saída da placa) foram realizadas de hora em hora.

Os dados de umidade relativa e de temperatura ambiente foram obtidos com o auxílio de um higrômetro manual, no local onde estava instalado o equipamento solar. Uma foto do higrômetro, utilizado neste estudo, pode ser visualizada na Figura 3.11.



Figura 3.11. Foto do higrômetro.

Os fluidos de processo utilizados neste trabalho foram: água, fornecida pela concessionária e uma solução salina de cloreto de sódio (sal de cozinha), a 5% em massa.

3.2.1 Utilização da água como fluido de processo

Os experimentos, utilizando água como fluido de processo, visaram à verificação dos valores de taxa de água evaporada ao longo do dia. Para tanto, efetuaram medições, de hora em hora, dos valores das vazões mássicas de água na entrada e na saída da placa plana e das variáveis ambientais já apresentadas.

Com os valores das vazões mássicas na entrada e saída da placa plana, foi possível a obtenção da taxa de água evaporada com o balanço de massa apresentado a seguir:

$$W_{ae} = W_i - W_f \quad (3.1)$$

Em que: W_{ae} é a taxa de água evaporada (g/s); W_i é a vazão mássica do líquido na entrada (g/s) e W_f é a vazão mássica do líquido na saída (g/s).

E a porcentagem de água evaporada foi determinada como:

$$\%AE = \frac{W_{ae}}{W_i} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Em que: %AE é a porcentagem de água evaporada (%).

3.2.2 Utilização de uma solução salina como fluido de processo

Os experimentos utilizando uma solução salina de cloreto de sódio (sal de cozinha), com 5% em massa, visaram à verificação dos valores de taxa de água evaporada ao longo do dia, comparando esses resultados com os valores de taxa de água evaporada quando se utiliza água como fluido de processo.

A solução salina, 5% em massa, foi preparada seguindo as etapas:

- a) Tarar um recipiente armazenador, com o auxílio de uma balança digital;

- b) Pesar 250,00 g de sal de cozinha, dentro deste recipiente;
- c) Completar com água até atingir 5,00 kg;
- d) Mexer até dissolver todo o sal.

Neste caso, também obtiveram medições, de hora em hora, dos valores das vazões mássicas da referida solução na entrada e na saída da placa e das variáveis ambientais apresentadas.

A partir desses valores de vazões mássicas efetuou-se um balanço de massa para estimar o valor da concentração final da solução. Esse balanço pode ser visualizado a seguir.

$$C_{is} \cdot W_{sc} = C_{fs} \cdot W_{sf} \quad (3.3)$$

Em que: C_{is} é a concentração inicial da solução (% em massa); W_{sc} é a vazão mássica da solução na entrada da placa plana (g/s); C_{fs} é a concentração final da solução (% em massa); W_{sf} é a vazão mássica da solução na saída da placa plana (g/s).

A partir do balanço a concentração final é dada por:

$$C_{fs} = \frac{C_{is} \cdot W_{sc}}{W_{sf}} \quad (3.4)$$

Com os valores das vazões mássicas na entrada e saída da placa plana, foi possível a obtenção da taxa de água evaporada com o balanço de massa apresentado a seguir:

$$W_{ae} = W_{sc} - W_{sf} \quad (3.1)$$

E a porcentagem de água evaporada foi determinada como:

$$\%AE = \frac{W_{ae}}{W_{sc}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

3.2.3 Procedimento para a realização dos experimentos

O procedimento de operação de cada experimento completo, com ou sem pré-aquecimento da alimentação, está descrito a seguir:

- a) Colocar a placa plana na inclinação desejada, pré-determinada para o experimento;
- b) Colocar o fluido de trabalho no recipiente alimentador;
- c) Ligar a bomba peristáltica no valor da vazão pré-determinada para o experimento;
- d) Ajustar a vazão da bomba peristáltica por tentativas, ou seja: medir a vazão mássica com o auxílio de uma balança e um cronômetro e verificar se este ponto de operação forneceu a vazão requerida para o ensaio, se o valor obtido não foi o desejado, repetir o processo. O processo deve ser repetido, até a obtenção de um valor de vazão aceitável;
- e) Garantir mecanicamente (com o auxílio das mãos) a molhabilidade de toda superfície da placa, no início de cada experimento;
- f) As 9:00 horas, realizar a primeira aquisição de dados: temperatura ambiente, umidade relativa, pressão atmosférica, temperatura da solução (na entrada e na saída da placa) e vazão mássica (na entrada e na saída da placa);
- g) Completar o nível do alimentador até o nível máximo, com o fluido de processo, antes de cada aquisição de dados subseqüentes;
- h) Realizar as próximas aquisições de dados (de hora em hora) de maneira análoga a aquisição realizada as 9:00 horas;
- i) Desligar o equipamento após a obtenção dos dados das 16:00 horas.

3.3 Ensaio preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados para verificar a eficácia do funcionamento do equipamento desenvolvido e construído neste trabalho e também para verificar quais as

variáveis que influenciam a taxa de evaporação.

Verificou-se que a vazão do líquido de alimentação e a inclinação da placa plana influenciam o mecanismo de evaporação solar, assim como algumas variáveis meteorológicas (radiação solar total e difusa incidente sobre o equipamento, temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do vento). Como os ensaios foram realizados em ambiente aberto (outdoor), não há como controlar as variáveis meteorológicas, mas elas foram constantemente monitoradas durante a realização de todos os ensaios, para verificar sua influência na taxa de evaporação, ao longo do dia.

As variáveis escolhidas como variáveis de entrada (controladas) foram: a vazão do líquido de alimentação e a inclinação da placa e como variável de saída (ou resposta) foi medida a taxa de evaporação, que pode ser escrita como porcentagem de água evaporada.

3.4 Planejamento experimental

Após testes preliminares de funcionamento do equipamento e verificação da influência das variáveis, foi realizada uma série experimental baseada em Box, Hunter e Hunter, 1978, de um planejamento fatorial 2^2 com 6 repetições do ponto central, para cada horário do dia.

As variáveis de entrada foram: a vazão do fluido de alimentação e a inclinação da placa e a variável de saída foi a taxa de evaporação. É necessário lembrar que as variáveis meteorológicas também interferem na taxa de evaporação, porém não foram escolhidas como variáveis de entrada, pelo fato de não poderem ser controladas.

Foram estabelecidos níveis de variação para os pontos fatoriais de cada variável: um nível codificado superior (+1), um nível codificado inferior (-1) e um nível de variação para os

pontos centrais (0). A escolha do nível mínimo de vazão se fez a partir da vazão mínima suficiente para formar um filme sobre a superfície da placa e a escolha do nível máximo se fez pela limitação da bomba peristáltica.

A escolha do nível mínimo e máximo da inclinação da placa se fez baseado em informações encontradas na literatura. O valor de inclinação de 20° foi estipulado pelo fato da maioria dos artigos publicados no Brasil fixarem o equipamento no valor de inclinação próximo a latitude de São Paulo (23°33' S) e o valor de inclinação de 60° foi estipulado como valor máximo, pois acima deste valor o escoamento foi muito rápido desfavorecendo a evaporação. A Tabela 3.1 a seguir, mostra os níveis estabelecidos para os níveis máximos, mínimos e para o ponto central para a vazão de alimentação e para a inclinação da placa.

Tabela 3.1 - Codificação das variáveis originais.

x_1	Vazão de Entrada W_i (g/s)	x_2	Inclinação da Placa (°)
-1	1,5	-1	20°
0	3,0	0	40°
+1	4,5	+1	60°

Uma vez constatada pela interpretação dos resultados do planejamento fatorial, que as duas variáveis eram significativamente influentes na taxa de evaporação, procederam-se alguns estudos com o objetivo de obter o melhor desempenho da taxa de evaporação, segundo a inclinação da placa e o mecanismo de transporte de calor e massa durante a evaporação, seguindo os procedimentos experimentais, descritos a seguir.

3.5 Procedimentos experimentais

Foram estabelecidos dois procedimentos experimentais para verificar a importância de se adequar à inclinação da placa plana, mensalmente: no *procedimento 1* a placa plana foi fixada na inclinação determinada pelo cálculo (obtido com a metodologia descrita no item 2.3.1 deste trabalho) e a vazão foi variada de 1,5 a 4,5 g/s para verificar o comportamento do equipamento frente à variação de vazão de alimentação. No *procedimento 2* a placa foi fixada no valor de inclinação médio anual para a cidade de São Paulo (20,5°) e a vazão foi fixada no valor em que se obtiveram maiores valores de taxa de evaporação no *procedimento 1*, para verificar quanto o valor da taxa de evaporação foi afetado se a inclinação for fixa durante o ano todo e não ser ajustada mensalmente.

3.6 Transporte de calor e de massa

O equacionamento do transporte de momentum, calor e massa, desenvolvido neste trabalho foi baseado nas equações desenvolvidas por outros autores, como descrito no item 2.5 deste trabalho.

Os valores de velocidade do vento necessários para a realização do cálculo do transporte de calor, foram obtidos por meio do site do INPE (www.cptec.inpe.br/sonda/), que apresenta resultados obtidos com um anemômetro 05103 R.M. Young Wind Monitor da Campbell Scientific, com erro máximo na ordem de $\pm 0,3$ m/s nas medidas de velocidade do vento.

3.7 Metodologia de interpretação dos resultados

Todos os experimentos foram realizados em dias de sol pleno (sem nuvens), visando manter a quantidade de radiação solar incidente o mais similar possível, atenuando os efeitos da diferença de incidência da radiação solar em dias diferentes. Para verificar essa similaridade dos valores de radiação solar em diferentes dias, foi necessário o cálculo da energia acumulada direta e difusa a partir de dados de irradiância global e difusa fornecidos pelo INPE, no site (www.cptec.inpe.br/sonda/). Os cálculos da energia acumulada foram realizados a partir da integração dos valores de radiação solar direta e difusa ao longo do dia, utilizando para isso a regra dos trapézios. Esses resultados estão apresentados em forma de figura, para todos os dias em que foram realizados ensaios experimentais.

A análise dos planejamentos experimentais (estimativa de efeitos e ANOVA da regressão) foi obtida pelo software MINITAB, para a resposta da % de evaporação. A partir desses dados efetuou-se uma interpretação para verificação da significância ou não do efeito das variáveis e de suas iterações, bem como, a adequação do modelo de regressão através do coeficiente de determinação e da análise de resíduos.

A análise da influência da variação da vazão de alimentação, para uma mesma inclinação e um mesmo dia, foi verificada a partir dos resultados experimentais obtidos seguindo o *procedimento 1*.

Quanto à inclinação da placa, comparam-se os resultados obtidos com os *procedimentos experimentais 1 e 2* para verificar se realmente foi importante realizar um ajuste mensal da inclinação da placa e se a discrepância desses valores experimentais são elevadas.

Os resultados de transporte de calor e de massa obtidos neste trabalho (utilizando as equações definidas no item 2.5 e os valores experimentais) foram comparados com valores obtidos por outros autores [SRITHAR, MANI (2003); SARTORI (1996)], pesquisados na literatura.

3.8 Tratamento dos dados de radiação solar

Os dados de intensidade de radiação solar global e difusa foram monitorados e fornecidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) localizado na cidade de São Paulo (latitude de 23°39' sul). Todos os dados foram medidos em uma plataforma localizada sobre o prédio do IAG/USP, no próprio campus.

Os valores de radiação global foram obtidos por meio de um piranômetro do tipo Eppley (modelo PBW) que pode ser visualizado na Figura 3.12, no plano horizontal com uma frequência de 0,2Hz, que lê valores com comprimento de onda entre 285-2800nm.

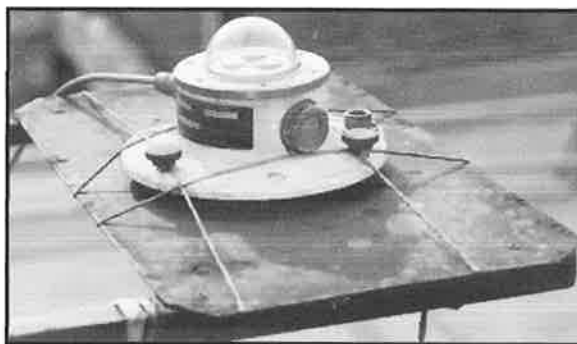


Figura 3.12. Foto do piranômetro do tipo Eppley-PBW nas instalações do IAG. Fonte: (<http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro>).

Os valores de radiação difusa foram obtidos por meio de um piranômetro do tipo Eppley (modelo PSP), no plano horizontal com a adição de um anel de sombreamento para eliminar a radiação direta no equipamento. Esse equipamento pode ser visualizado na Figura 3.13. Os anéis de sombreamento foram constituídos de uma faixa metálica circular, fixa, com um diâmetro de 80 cm e largura de 10 cm.



Figura 3.13. Foto do piranômetro do tipo Eppley-PSP nas instalações do IAG. Fonte: (<http://www.iag.usp.br/meteo/labmicro>).

Os dados horários de radiação solar (global e difusa) provenientes do IAG correspondem aos valores médios de radiação solar incidente, durante o período de uma hora. A seguir, foi realizado o cálculo da radiação solar incidente ao longo do dia. Esses valores podem ser visualizados no ANEXO II, juntamente com os valores da média mensal da radiação incidente na cidade de São Paulo.

Uma base confiável de dados deve englobar medidas de radiação por um longo período de tempo. Para tanto, os valores utilizados neste trabalho foram uma média de valores correspondentes aos anos de 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 e 2004, que podem ser visualizados na Figura 3.14.

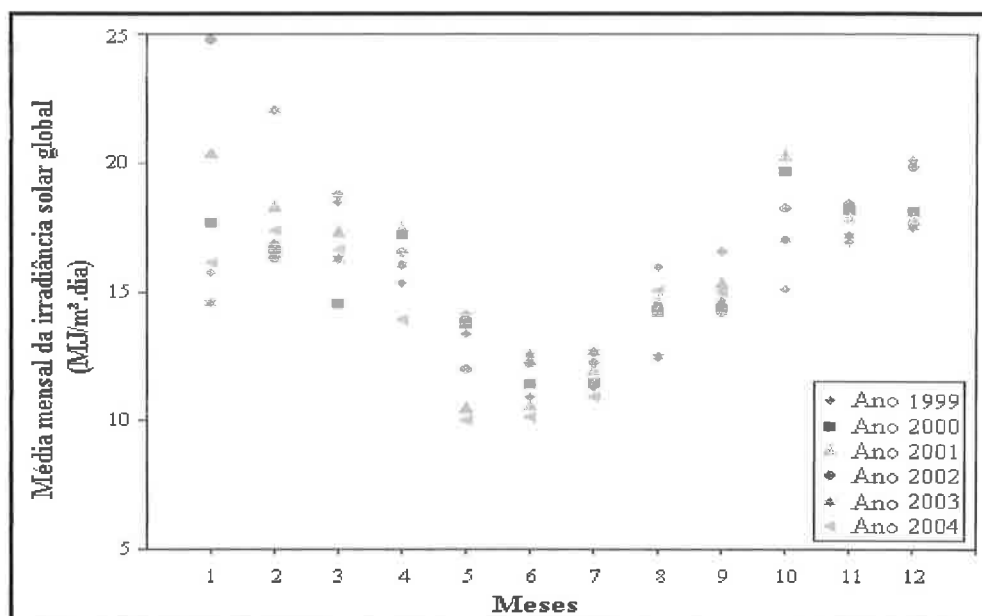


Figura 3.14. Média mensal da radiação solar global incidente sobre a cidade de São Paulo. Elaboração própria, a partir de dados do IAG - USP.

Nesta figura nota-se a discrepância dos valores de radiação solar para o mesmo mês de diferentes anos, causada por diferenças climáticas. Esse fato confirma a necessidade da utilização de valores médios de radiação solar, relativos aos últimos seis anos para atenuar os efeitos dessa discrepância. Infelizmente a série dos dados de radiação solar não está completa, restringindo-se até o mês de setembro de 2004.

Os dados provenientes do IAG foram manipulados com a finalidade de determinar a média mensal da irradiância global e difusa incidentes em uma superfície com uma inclinação qualquer, a partir dos valores da média mensal da irradiância global e difusa em uma superfície horizontal. Esses valores foram essenciais para calcular a inclinação teórica, a partir do modelo de Liu e Jordan mostrado na equação (2.12), em que a placa plana deve ser colocada para maximizar a absorção de radiação solar, em coletores instalados na cidade de São Paulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos nas etapas experimentais realizadas neste trabalho. Inicialmente, foram realizados testes preliminares para comprovar o funcionamento do equipamento. Então, foi realizado um planejamento fatorial em dois níveis (2^2), com 6 pontos centrais. Paralelamente a realização dos experimentos (seguindo o planejamento fatorial) calculou-se a inclinação mensal em que a placa plana deve ser fixada, na cidade de São Paulo, para maximizar a absorção da irradiância solar incidente. Esses valores de inclinações mensais foram comparados com as inclinações obtidas por outros autores, em outras localidades. Uma vez constatada a influência das variáveis de entrada (com os resultados experimentais obtidos seguindo o planejamento fatorial) e obtidos os valores de inclinação mensal da placa plana, foi estabelecido dois procedimentos experimentais para verificar em quais valores de vazão e inclinação da placa o equipamento deve trabalhar, para obter maiores valores de %Evap. Por último, foi apresentada uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com resultados obtidos por outros autores [SRITHAR, MANI (2003); SARTORI (1996)], no que diz respeito a transporte de calor e massa de um líquido escoando sobre a superfície de uma placa plana.

4.1 Resultados dos testes preliminares

Durante a construção de cada uma das partes constituintes do evaporador solar, utilizado neste trabalho, foram realizados alguns experimentos preliminares no laboratório, cuja finalidade foi

verificar qual o procedimento de montagem mais eficiente e quais as variáveis que possivelmente influenciavam o processo de evaporação.

Algumas observações foram primordiais nesta etapa experimental, a saber:

- a) O promotor de película foi aderido sobre toda a superfície da placa plana, de várias maneiras (cola de contato, cola para canos, pregos e “tachinhas metálicas”). O uso das colas não foi apropriado, pois durante a fixação do promotor elas obstruíram todos os orifícios da malha, descaracterizando-o. A maneira que se mostrou mais eficiente foi o uso de “tachinhas metálicas”;
- b) A fixação do promotor de película visou à perfeita aderência do mesmo com à superfície da placa e para tanto foi necessário tensionar a malha sob a ação de calor, durante sua colocação. Com esse procedimento evitou-se que a malha se dilatasse quando exposta aos raios solares, criando regiões sem perfeita aderência “bolhas”, impedindo o perfeito escoamento;
- c) A inclinação da placa plana influenciou a velocidade de escoamento do fluido em sua superfície e conseqüentemente a taxa de evaporação. Pois, as inclinações próximas da vertical, acarretaram uma maior velocidade de escoamento do filme descendente e tempo de residência curto para o aquecimento de todo líquido, acarretando menores valores de taxa de evaporação. Entretanto, quanto mais às inclinações se aproximaram da horizontal, menor foi a velocidade de escoamento e maior a taxa de evaporação;
- d) Notou-se que a vazão de alimentação também influenciou a taxa de evaporação. Pois, valores baixos de vazão não formaram um filme uniforme sobre toda a superfície da placa, diminuindo a área de troca térmica e um conseqüente decréscimo dos valores % Evap. Valores elevados de vazão ocasionaram uma maior espessura do filme descendente,

diminuindo a temperatura da superfície da placa, ocasionando uma diminuição da temperatura do filme e da taxa de evaporação;

- e) As variáveis meteorológicas exerceram influencia na taxa de evaporação, entretanto não podem ser controladas, devendo ser monitoradas constantemente durante a realização de todos os experimentos;
- f) Para pintar a superfície da placa utilizou-se neutrol para impermeabilizar e enegrecer a superfície. Como o neutrol apresenta brilho, não é considerado ideal para absorver a irradiância solar incidente, pois reflete uma grande parcela desta irradiância e foi necessário cobri-lo com uma demão de tinta preta fosca.

Após o término da montagem do equipamento e a comprovação da eficácia de seu funcionamento, procedeu-se a realização de um planejamento experimental, cujos resultados determinam se a vazão de alimentação e a inclinação da placa plana realmente influenciam a taxa de evaporação e de que maneira essa influência varia ao longo do dia.

4.2 Resultados dos planejamentos experimentais

Após a realização dos testes preliminares, foram elaborados vários planejamentos fatoriais em dois níveis (2^2) com 6 repetições do ponto central, um para cada hora do dia. Todos os planejamentos foram baseados em Box, Hunter e Hunter, 1978.

As variáveis escolhidas como variáveis de entrada foram: a vazão do líquido de alimentação e a inclinação da placa plana e a variável escolhida como variável resposta foi: a taxa de evaporação.

Foram estabelecidos intervalos de variação para os pontos fatoriais de cada uma das variáveis. Para a vazão de alimentação, o nível mínimo (-1) corresponde ao valor de vazão de 1,5 g/s, valor mínimo necessário para formar um filme sobre toda a superfície da placa, o nível máximo (+1) corresponde ao valor de vazão de 4,5 g/s, pela limitação da bomba peristáltica e os pontos centrais (0) correspondem a um valor de vazão de 3,0 g/s.

Para a inclinação da placa plana, o nível mínimo (-1) correspondeu ao valor da inclinação de 20°, valor próximo da latitude da cidade de São Paulo (23°33' S), em que maioria dos trabalhos realizados mantém a inclinação fixa durante todo o ano, o nível máximo (+1) correspondeu ao valor de inclinação de 60°, pois acima deste valor a evaporação foi prejudicada pelo aumento da velocidade de escoamento e os pontos centrais (0) correspondem a um valor de inclinação de 40°.

Faz-se necessário lembrar que os experimentos foram realizados em ambiente aberto e que as variáveis meteorológicas exerceram influencia nos valores de taxa de evaporação, entretanto não podem ser escolhidas como variáveis de entrada, pelo fato de não poderem ser controladas.

Os experimentos planejados foram realizados, na cobertura do prédio de Engenharia Química da Universidade de São Paulo, mais precisamente no prédio semi-industrial. Os experimentos seguiram o procedimento descrito no item 3.2.3, nos meses: novembro/04, dezembro/04 e março/05. Os valores de vazão de alimentação e inclinação da placa foram variados de hora em hora, sendo determinados pela planilha obtida com o planejamento fatorial. Esta planilha pode ser visualizada no ANEXO III, juntamente com os resultados experimentais e das variáveis meteorológicas (pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura ambiente, temperatura do líquido na entrada e na saída da placa) monitoradas, ao longo do dia. A ordem

aleatória de realização dos experimentos foi obtida por sorteio, para evitar uma tendência dos resultados.

Como mencionado no item 3.7 da metodologia, os valores de energias (direta e difusa) acumuladas ao longo de cada dia em que foram realizados os experimentos devem ser observados. Para tanto, construíram-se as Figuras 4.1 (a) a 4.1 (j) a partir dos valores de irradiância solar direta e difusa, incidente na cidade de São Paulo, provenientes do site do INPE, juntamente com os valores das energias direta e difusa, acumuladas ao longo do dia.

Os cálculos da energia acumulada foram realizados a partir da integração dos valores de irradiância solar direta e difusa ao longo do dia, utilizando para isso a regra dos trapézios.

A análise das Figuras 4.1 (a) a 4.1 (j) mostrou que a irradiância direta e difusa realmente variam de um dia para outro e também no decorrer do dia. Por outro lado, foi possível observar que nestes dias os valores da irradiância difusa foram sempre relativamente baixos na região onde os valores da irradiância direta foram máximos. Observou-se também que a energia acumulada direta apresenta valores próximos a $30 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}$ para todos os dias em que foram realizados os experimentos e a energia acumulada difusa apresenta valores próximos a $8 \text{ MJ/m}^2.\text{dia}$. Portanto, a diferença entre os valores de energia direta acumulada ao longo do dia, não foi muito relevante entre dias diferentes, considerando-se então dias com comportamento semelhante em relação à energia acumulada direta. O mesmo ocorreu com a energia difusa acumulada ao longo do dia tornando possível considerar que os dias apresentaram comportamento semelhante em relação à energia acumulada direta.

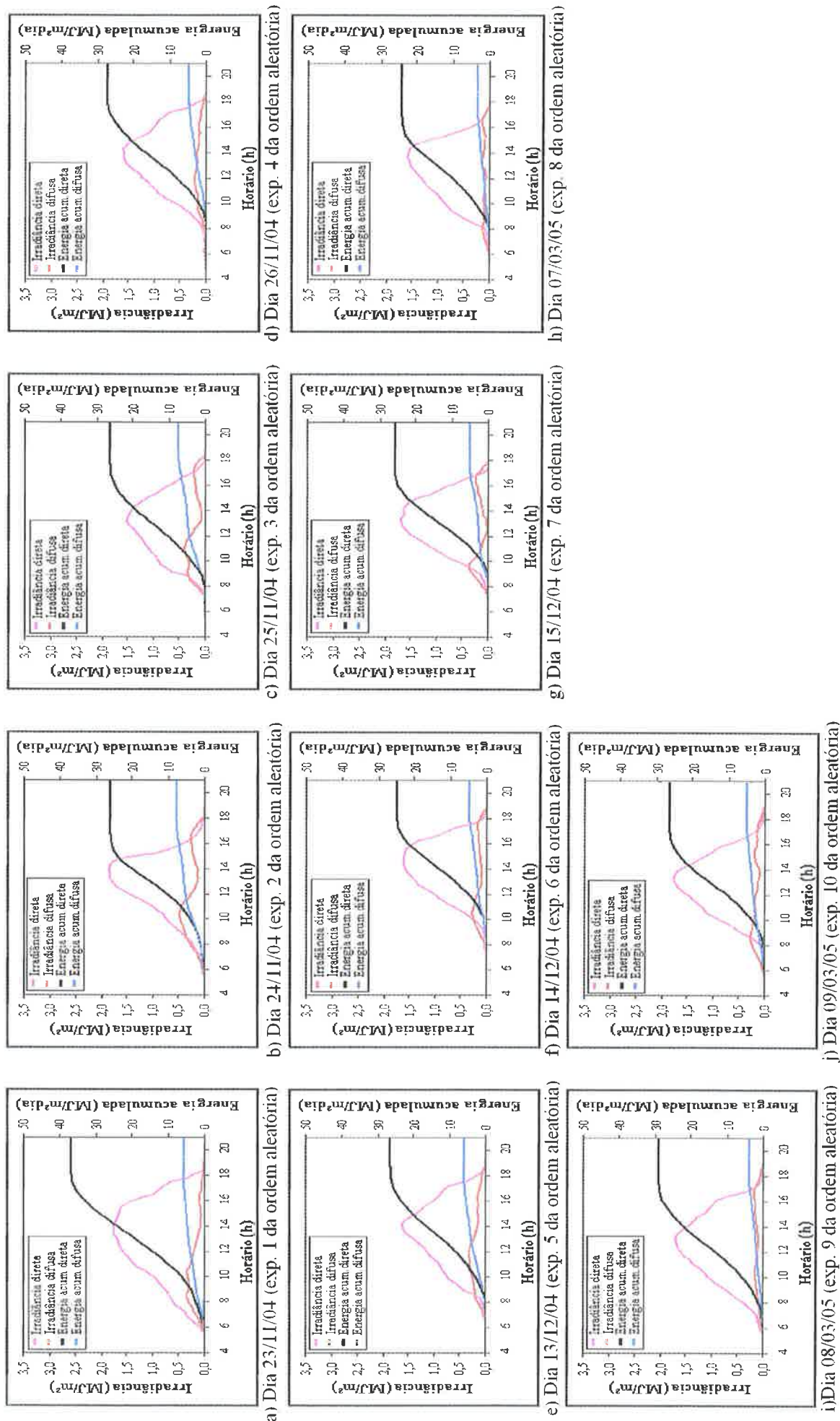


Figura 4.1. Irradiância solar e energia acumulada nos dias em que foram realizados os experimentos planejados.

Como os dias apresentaram comportamento semelhante em relação às energias direta e difusa, acumuladas ao longo do dia, não interferindo no valor da porcentagem de evaporação, foi realizada uma análise mais detalhada dos resultados visando a influencia da variação de vazão na %Evap. Esses valores experimentais podem ser visualizados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Planejamento experimental e resultados obtidos.

Vazão Cod.	Inclinação Cod.	%Evap (9:00 hs)	%Evap (10:00 hs)	%Evap (11:00 hs)	%Evap (12:00 hs)	%Evap (13:00 hs)	%Evap (14:00 hs)	%Evap (15:00 hs)	%Evap (16:00 hs)
-1	-1	10,0	14,2	16,5	20,7	16,7	16,4	12,8	11,97
+1	-1	4,5	4,2	6,0	6,7	7,0	9,7	9,5	7,0
-1	+1	4,7	7,4	11,8	15,2	15,1	14,7	8,8	10,8
+1	+1	1,1	2,0	5,2	6,4	5,3	10,7	6,1	5,1
0	0	4,6	8,0	7,9	6,7	6,5	8,0	6,4	5,6
0	0	5,0	6,8	7,3	10,8	9,6	4,7	5,8	9,2
0	0	4,9	4,6	5,6	11,1	9,6	7,2	6,4	5,0
0	0	4,3	7,9	5,6	8,2	9,9	10,6	7,8	4,6
0	0	4,7	6,3	7,7	9,7	9,3	8,4	8,1	5,8
0	0	3,4	4,7	5,9	11,1	7,0	8,4	6,6	5,6

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.1 verifica-se que os valores de porcentagem de evaporação obtidos experimentalmente variam para cada horário de um mesmo dia. Esse fato ocorreu porque os valores de irradiância solar incidente sobre o equipamento e outras variáveis meteorológicas (pressão atmosférica, temperatura atmosférica, umidade relativa e velocidade do vento) não se mantiveram constantes ao longo do dia.

Nota-se também que os resultados de % Evap obtidos em dias diferentes, para um mesmo horário, mesma vazão de alimentação e mesma inclinação da placa (pontos centrais), também apresentam diferenças, ocasionadas pela diferença do ângulo de incidência dos raios solares

(em diferentes horários e diferentes dias) sobre a superfície da placa inclinada e pelas variáveis ambientais.

Dentre todos os experimentos realizados, o que apresentou maiores valores de porcentagem de evaporação, ao longo de todo o dia, foi o experimento que manteve uma inclinação da placa plana de 20° e uma vazão de alimentação de 1,5 g/s. Estes resultados seriam esperados por análise física, uma vez que, vazões baixas implicam em menor espessura do filme e maior temperatura na interface beneficiando a evaporação (lembrando que valores de vazão abaixo de 1,5 g/s não formam um filme estável sobre toda a superfície). Quanto à inclinação da placa, valores próximos a horizontal acarretam em uma menor velocidade de escoamento do líquido, aumentando o tempo de residência do líquido em contato com a superfície aquecida da placa plana, beneficiando a troca térmica e conseqüentemente elevando os valores de %Evap, devido à inclinação dos raios solares (ver Figura 2.8) nos meses em que foram realizados os experimentos.

Os maiores valores de porcentagem de evaporação ocorreram das 11:00 horas as 15:00 horas em todos os experimentos. Isso é uma constatação do que foi mencionado anteriormente sobre a influência dos altos valores de irradiância direta e baixos de irradiância difusa e das variáveis ambientais, pois neste horário o ambiente geralmente apresenta-se com baixos valores de umidade relativa e maiores valores de temperatura ambiente (ver ANEXO III).

A partir dos resultados experimentais, mostrados na Tabela 4.1, foram estimados os efeitos, os coeficientes e a análise de variância da regressão, gerados pelo software MINITAB, para a resposta da porcentagem de evaporação.

Os resultados dos efeitos e dos coeficientes, para cada hora do dia, podem ser visualizados nas Tabelas 4.2 (a) a 4.2 (j).

Tabela 4.2 - Estimativa dos efeitos e dos coeficientes.

a) 9:00 horas					b) 10:00 horas				
Termo	Efeito	Coefficiente	T	P	Termo	Efeito	Coefficiente	t	P
Média		4,720	22,90	0,000	Média		6,610	14,86	0,000
x ₁ (Vazão)	-4,550	-2,275	-6,98	0,001	x ₁ (Vazão)	-7,700	-3,850	-5,47	0,002
x ₂ (Inclinação)	-4,350	-2,175	-6,67	0,001	x ₂ (Inclinação)	-4,500	-2,250	-3,20	0,019
x ₁ . x ₂	0,950	0,475	1,46	0,195	x ₁ . x ₂	2,300	1,150	1,63	0,153
c) 11:00 horas					d) 12:00 horas				
Termo	Efeito	Coefficiente	t	P	Termo	Efeito	Coefficiente	t	P
Média		7,950	11,14	0,000	Média		10,660	14,34	0,000
x ₁ (Vazão)	-8,550	-4,275	-3,79	0,009	x ₁ (Vazão)	-11,40	-5,700	-4,85	0,003
x ₂ (Inclinação)	-2,750	-1,375	-1,22	0,269	x ₂ (Inclinação)	-2,900	-1,450	-1,23	0,264
x ₁ . x ₂	1,950	0,975	0,86	0,421	x ₁ . x ₂	2,600	1,300	1,11	0,311
e) 13:00 horas					f) 14:00 horas				
Termo	Efeito	Coefficiente	t	P	Termo	Efeito	Coefficiente	t	P
Média		9,600	14,97	0,000	Média		9,880	8,65	0,000
x ₁ (Vazão)	-9,750	-4,875	-4,81	0,003	x ₁ (Vazão)	-5,350	-2,675	-1,48	0,189
x ₂ (Inclinação)	-1,650	-0,825	-0,81	0,447	x ₂ (Inclinação)	-0,350	-0,175	-0,10	0,926
x ₁ . x ₂	-0,050	-0,025	-0,02	0,981	x ₁ . x ₂	1,350	0,675	0,37	0,722
g) 15:00 horas					h) 16:00 horas				
Termo	Efeito	Coefficiente	t	P	Termo	Efeito	Coefficiente	t	P
Média		7,830	14,12	0,000	Média		7,067	9,72	0,000
x ₁ (Vazão)	-3,000	-1,500	-1,71	0,137	x ₁ (Vazão)	-5,335	-2,668	-2,32	0,059
x ₂ (Inclinação)	-3,700	-1,850	-2,11	0,079	x ₂ (Inclinação)	-1,535	-0,768	-0,67	0,529
x ₁ . x ₂	0,300	0,150	0,17	0,870	x ₁ . x ₂	-0,365	-0,183	-0,16	0,879

As Tabelas 4.2 (a) e 4.2 (b) mostram que a vazão e a inclinação da placa foram estatisticamente significativas as 9:00 e as 10:00, mas que a interação entre estas variáveis não. Enquanto que as Tabelas 4.2 (c), 4.2 (d), 4.2 (e) e 4.2 (h) mostram que apenas a vazão de alimentação exerceu influência na %Evap obtida nestes horários (11:00 h, 12:00h, 13:00h e às 16:00 h respectivamente).

Os valores dos efeitos da vazão e da inclinação da placa foram muito próximos, somente as 9:00 horas (-4,55 e -4,35) e as 15:00 horas (-3,0 e -3,7). Nos outros horários do dia (10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00 e 16:00 horas) observou-se que a vazão de alimentação exerceu maior influência na %Evap do que a inclinação da placa, pois apresentou valores dos efeitos mais elevados. Observou-se também que o efeito da vazão de alimentação foi se tornando

mais acentuado das 9:00 até as 12:00 horas, diminuindo após esse horário. Esse fato pode ser explicado pelo ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície da placa plana inclinada. Nas primeiras horas da manhã esse ângulo apresenta baixos valores, e vai aumentando até atingir o valor máximo, chamado de ângulo zênite. Após esse valor, o ângulo de incidência dos raios solares ultrapassa o ângulo de zênite e o efeito da vazão vai se tornando menos significativo, até o pôr-do-sol.

Os resultados da análise de variância da regressão, para cada hora do dia em que foram realizados os experimentos, podem ser visualizados nas Tabelas 4.3 (a) a 4.3 (j).

Tabela 4.3 - Análise da variância da regressão.

a) 9:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	39,625	19,812	46,65	0,000
Iteração	1	0,903	0,902	2,12	0,195
Curvatura	1	0,840	0,840	2,46	0,178
Erro residual	5	1,708	0,342		
Erro puro	5	1,708	0,342		
TOTAL	9	43,076			

c) 11:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	80,665	40,333	7,92	0,021
Iteração	1	3,802	3,802	0,75	0,421
Curvatura	1	24,704	24,704	21,10	0,006
Erro residual	5	5,853	1,171		
Erro puro	5	5,853	1,171		
TOTAL	9	115,025			

e) 13:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	97,785	48,892	11,89	0,008
Iteração	1	0,003	0,0025	0,00	0,981
Curvatura	1	13,537	13,537	6,08	0,057
Erro residual	5	11,135	2,2270		
Erro puro	5	11,135	2,2270		
TOTAL	9	122,460			

g) 15:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	22,6900	11,3450	3,69	0,090
Iteração	1	0,0900	0,0900	0,03	0,870
Curvatura	1	14,4060	14,4060	17,85	0,008
Erro residual	5	4,0350	0,8070		
Erro puro	5	4,0350	0,8070		
TOTAL	9	41,2210			

b) 10:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	79,5400	39,7700	20,09	0,002
Iteração	1	5,2900	5,2900	2,67	0,153
Curvatura	1	0,7707	0,7707	0,35	0,581
Erro residual	5	11,1083	2,2217		
Erro puro	5	11,1083	2,2217		
TOTAL	9	96,7090			

d) 12:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	138,370	69,185	12,51	0,007
Iteração	1	6,760	6,760	1,22	0,311
Curvatura	1	16,854	16,854	5,16	0,072
Erro residual	5	16,320	3,264		
Erro puro	5	16,320	3,264		
TOTAL	9	178,304			

f) 14:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	28,745	14,372	1,10	0,391
Iteração	1	1,822	1,822	0,14	0,722
Curvatura	1	59,800	59,800	16,14	0,010
Erro residual	5	18,528	3,706		
Erro puro	5	18,528	3,706		
TOTAL	9	108,896			

h) 16:00 horas

Fator	GL	SS	MS	F	P
Efeitos	2	30,8185	15,4092	2,92	0,050
Iteração	1	0,1332	0,1332	0,03	0,879
Curvatura	1	18,1610	18,1610	6,70	0,049
Erro residual	5	13,5533	2,7107		
Erro puro	5	13,5533	2,7107		
TOTAL	9	62,6660			

As Tabelas 4.3 (a) e 4.3 (b) mostraram que a curvatura não foi significativa as 9:00 e 10:00 horas, por isso a %Evap pode ser representada por um modelo linear, em função da vazão de alimentação e da inclinação da placa plana, sendo representado pelas equações (4.1) e (4.2), respectivamente.

$$\%Evap = 4,720 - 2,275x_1 - 2,175x_2 \quad (4.1)$$

$$\%Evap = 6,610 - 3,850x_1 - 2,250x_2 \quad (4.2)$$

As outras tabelas mostram que a curvatura foi significativa a partir das 11:00 horas, pois a probabilidade relativa à curvatura apresentou menores valores. Neste caso, pode-se dizer que o modelo não pode ser representado por um modelo linear, pois há uma tendência de curvatura, podendo mostrar a proximidade de um ponto extremum. Para determinação e localização deste ponto seria necessário a realização de mais uma série experimental com os pontos axiais, porém a realização dessa série experimental é desnecessária porque o planejamento fatorial já indicou a influência da vazão de alimentação e da inclinação da placa na taxa de evaporação.

A partir desta constatação foram realizados alguns estudos com o objetivo de obter o melhor desempenho do equipamento. Uma alternativa para a melhoria com respeito à inclinação da placa foi realizar experimentos ajustando a inclinação da placa, conforme o ângulo de incidência da irradiância solar em superfícies inclinadas, calculado como apresentado no item 2.3.1, visando uma máxima absorção da irradiância solar.

4.3 Resultados dos cálculos da irradiância solar em superfícies inclinadas

Os cálculos dos valores de inclinação em que o coletor solar deve ser fixado para maximizar a absorção da irradiância solar, incidente na cidade de São Paulo, foram realizados seguindo o modelo proposto por Liu e Jordan (1960 apud Rosa, 2003) descrito no item 2.3.1 deste trabalho.

Construiu-se uma planilha de cálculos para obtenção dos valores da média mensal da irradiância global na superfície com diferentes inclinações. Para tanto, foram utilizados os valores das médias mensais da irradiância solar (global e difusa) no plano horizontal, valor da latitude de São Paulo ($23^{\circ}33'S$), valor da média mensal da declinação solar (esses valores podem ser visualizados no ANEXO IV), diferentes valores de inclinação da placa (variando de 0° a 80°) e valores do ângulo horário do nascer do Sol (no plano horizontal e no plano inclinado).

Os valores de médias mensais da irradiância solar global e difusa, no plano horizontal, foram fornecidos pelo Instituto de Astronomia e Geofísica (I.A.G.) da Universidade de São Paulo, para os anos de 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 e 2004.

A partir dos resultados obtidos com essa planilha foi possível verificar qual inclinação da placa ocasionou um maior valor de média mensal da irradiância global na superfície inclinada, em cada mês do ano. Esse valor de inclinação foi considerado como a melhor inclinação em que se deve manter a placa naquele determinado mês, para maximizar a absorção da irradiância.

Os valores de irradiância global incidente na placa inclinada que foram obtidos para diferentes inclinações em cada mês, podem ser visualizados na Tabela 4.4, juntamente com o valor mensal da inclinação da placa em que a absorção de irradiância solar foi máxima.

Tabela 4.4 - Irradiância global incidente na placa inclinada para diferentes inclinações.

Meses	0°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	Melhor incl.
Janeiro	18,14	16,87	15,72	14,28	12,58	10,70	8,70	6,70	0,0
Fevereiro	17,81	17,13	16,22	14,97	13,41	11,59	9,59	7,47	1,5
Março	16,69	17,08	16,66	15,84	14,65	13,13	11,32	9,27	15,0
Abril	15,81	17,74	18,03	17,87	17,24	16,17	14,70	12,86	31,5
Maiο	12,03	14,44	15,11	15,39	15,27	14,76	13,86	12,62	42,0
Junho	11,36	14,40	15,37	15,93	16,06	15,77	15,05	13,94	48,0
Julho	11,47	14,25	15,10	15,55	15,58	15,19	14,41	13,24	45,5
Agosto	14,27	16,63	17,17	17,25	16,88	16,06	14,81	13,19	36,5
Setembro	15,31	16,10	15,91	15,32	14,37	13,08	11,48	9,63	20,0
Outubro	17,97	17,58	16,76	15,57	14,03	12,19	10,13	7,90	6,0
Novembro	18,08	16,92	15,80	14,38	12,69	10,80	8,78	6,73	0,0
Dezembro	18,81	17,27	15,98	14,39	12,56	10,56	8,47	6,42	0,0
Média Anual									20,5

A partir dos dados da tabela verifica-se que os equipamentos solares que contêm um coletor plano devem trabalhar com diferentes inclinações no decorrer do ano, para aumentar a eficiência de absorção solar do sistema.

Nota-se que os valores de inclinação foram mais elevados para os meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro. Nesses meses a Terra encontra-se mais inclinada em relação ao Sol, ocasionando temperaturas menores e dias mais curtos, ou seja, condições menos favoráveis à evaporação. Para os outros meses nota-se que a inclinação ideal é zero (posição horizontal).

4.3.1 Comparação de inclinações do coletor (em São Paulo) com inclinações de coletores em outras localidades

Os resultados das inclinações em que a absorção de irradiância foi máxima para a cidade de São Paulo foram comparados com resultados apresentados pelos autores Tiris e Tiris (1998) e pelos autores Hartley et al. (1999). Esses resultados também foram obtidos pelo modelo de Liu e Jordan (1960 apud Rosa, 2003) e podem ser visualizados na Tabela 4.5, juntamente com a localidade em que foram realizados os experimentos e sua respectiva latitude.

Tabela 4.5 - Inclinações do coletor na cidade de São Paulo e inclinações obtidas por outros autores em outras localidades.

Meses	Inclinação São Paulo – Brasil (latitude: 23°33'S)	Inclinação Gebse - Turquia (latitude: 40°47'N) (Tiris and Tiris, 1998)	Inclinação Valência – Espanha (latitude: 39°30'N) (Hartley et al, 1999)
Janeiro	0,0	61,0	58,5
Fevereiro	1,5	51,0	49,0
Março	15,0	37,0	35,0
Abril	31,5	21,0	20,0
Maiο	42,0	6,0	4,5
Junho	48,0	1,0	0,0
Julho	45,5	2,0	3,0
Agosto	36,5	16,0	14,5
Setembro	20,0	34,0	29,0
Outubro	6,0	48,0	45,5
Novembro	0,0	60,0	60,0
Dezembro	0,0	62,0	61,0
Média anual	20,5	33,2	31,0

Os valores de inclinação da cidade de São Paulo são mais elevados de abril a setembro, enquanto que os valores mais elevados para por Tiris e Tiris (1998) e para Hartley et al.

(1999) são para os meses de outubro a março. Essa diferença de meses ocorre pelo fato das cidades estarem situadas em diferentes hemisférios.

Nota-se que os valores de latitudes das cidades onde foram realizados os estudos são muito diferentes, acarretando uma diferença no valor da média anual.

4.4 Resultados experimentais

Os experimentos de avaliação de desempenho do equipamento foram realizados seguindo dois procedimentos experimentais: o *procedimento 1* para verificar o comportamento do equipamento frente à variação de vazão, ao longo do dia e o *procedimento 2* visa a verificação do quanto a taxa de evaporação foi afetada pela inclinação da placa, concluindo se foi realmente necessário o ajuste mensal da inclinação.

4.4.1 Resultados experimentais, seguindo o *procedimento 1*

No *procedimento 1* a placa plana foi fixada na inclinação determinada pelo cálculo (Tabela 4.4) enquanto que a vazão sofreu variação em seu intervalo conforme descrito a seguir: variação de 1,5 a 4,5 g/s de outubro a março e de julho a agosto; e variação de 2,0 a 3,0 g/s em abril, maio e setembro.

Ressalte-se que foram feitas pequenas alterações na inclinação da placa para os meses de outubro a fevereiro e junho/julho. Para os meses de outubro a fevereiro o cálculo indicou que a placa deveria ser colocada na posição horizontal. Esta posição dificulta o escoamento e por

isso foi necessária a realização de experimentos adicionais para verificar qual a inclinação mais próxima à horizontal que não o prejudicasse. Verificou-se que a partir de $3,25^\circ$ o líquido passa a escoar normalmente sobre a placa. Então, durante esta série de experimentos, a inclinação foi mantida em $3,25^\circ$. Nos meses de junho e julho em decorrência do inverno na cidade de São Paulo houve uma diminuição de dias em que se pudessem realizar os experimentos completos. Como os valores calculados de inclinação da placa, mostrados na Tabela 4.4, para esses meses foram próximos (48° para o mês de junho e $45,5^\circ$ para o mês de julho), optou-se por realizar os experimentos com a placa fixada na inclinação média ($46,75^\circ$).

Para um melhor acompanhamento e interpretação dos resultados obtidos com os experimentos as variáveis ambientais foram acompanhadas com medições horárias em todos os dias em que foram realizados os experimentos. Esses valores acompanharam os resultados experimentais quando as tabelas de dados foram construídas.

Para os dias de realização dos experimentos nas condições supra citadas foram levantados no site do INPE (www.cptec.inpe.br/sonda/) os dados de irradiância global e difusa, a partir dos quais foram calculados os valores de irradiância direta e de energias acumuladas (direta e difusa). Estes dados estão plotados nas Figura 4.2, para os meses de outubro a fevereiro, Figura 4.3 para o mês de março, Figura 4.4 para o mês de abril, Figura 4.5 para o mês de maio, Figura 4.6 para os meses de junho e julho, Figura 4.7 para o mês de agosto e Figura 4.8 para o mês de setembro.

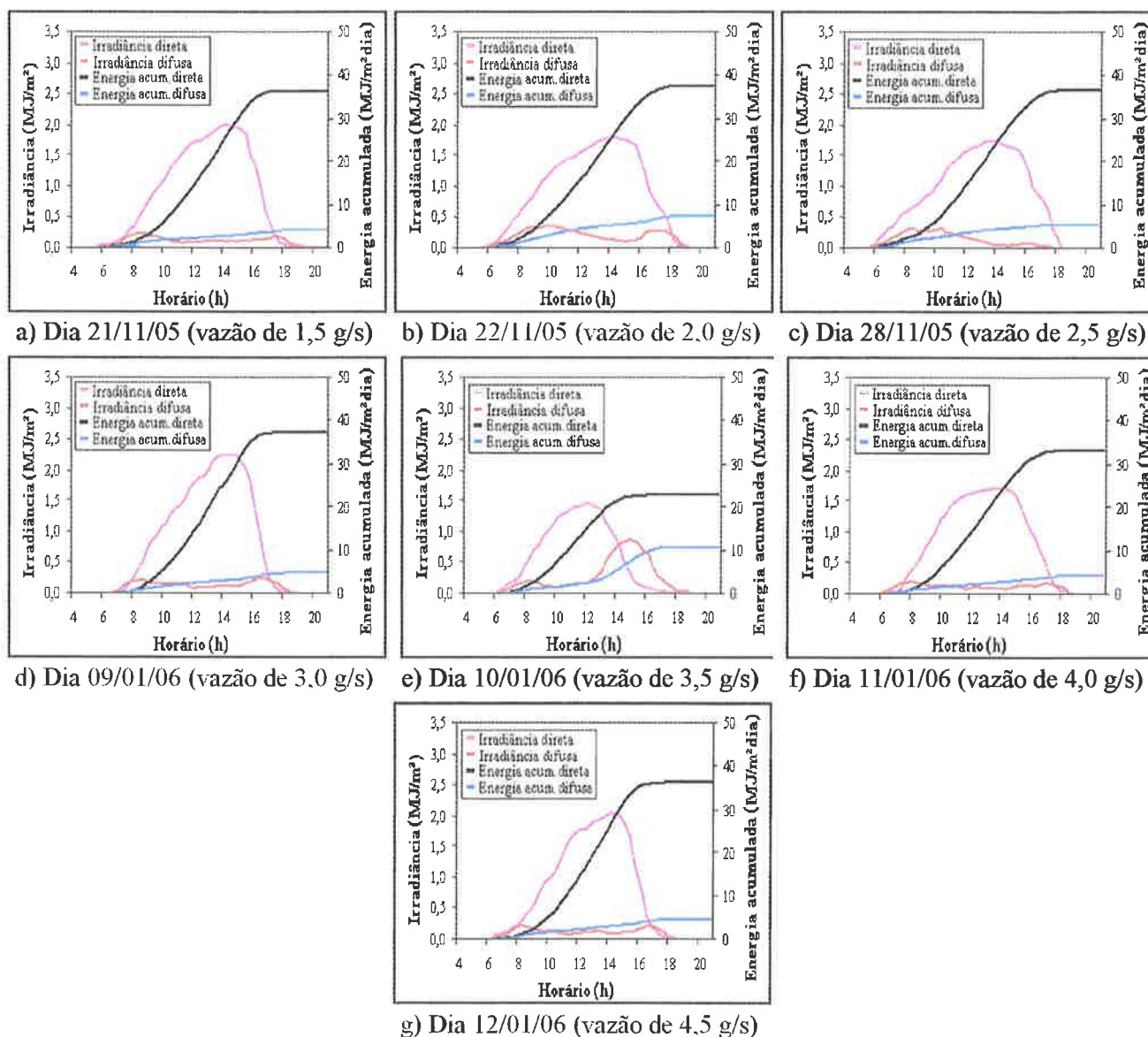


Figura 4.2. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos nos meses de outubro a fevereiro.

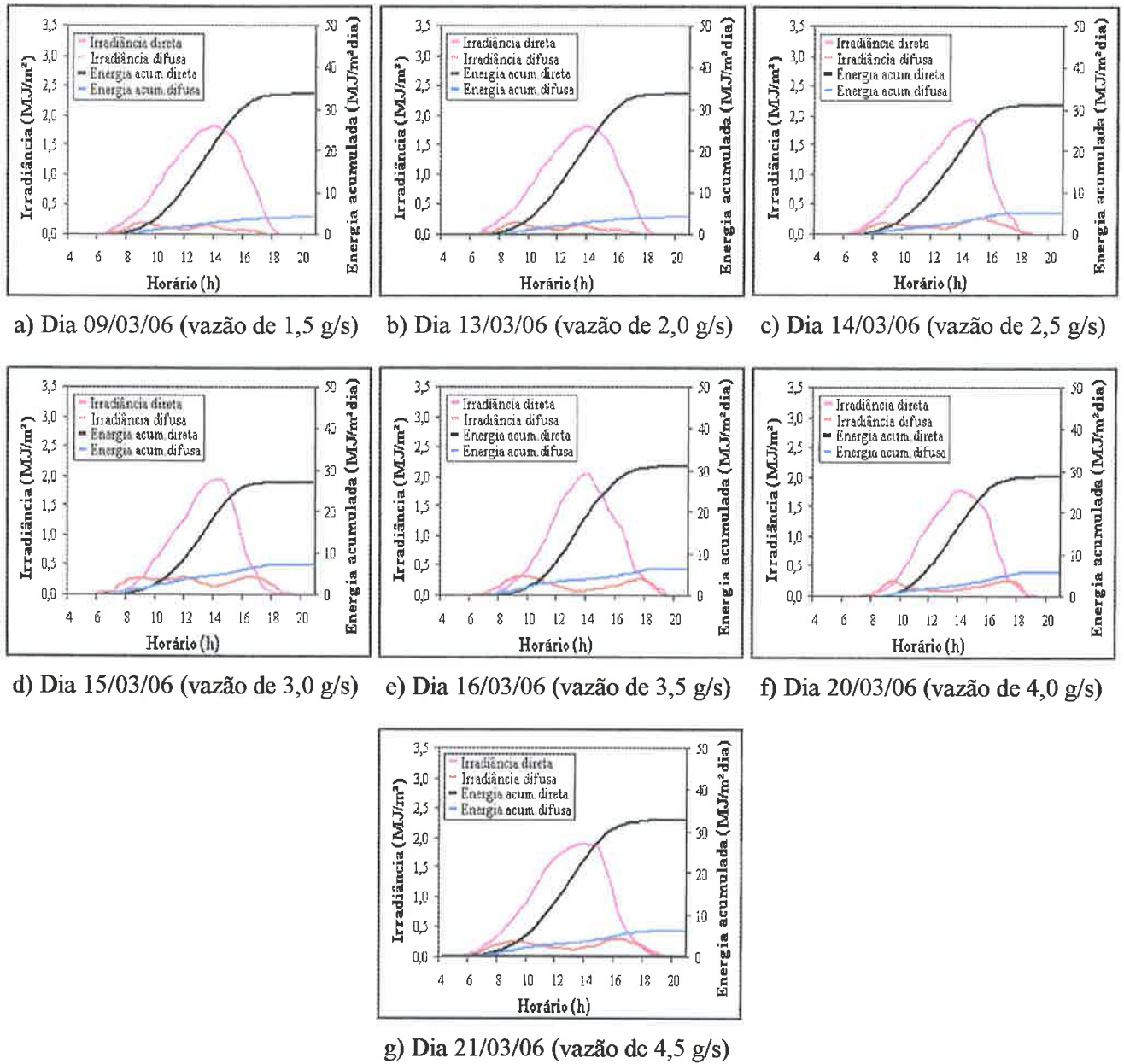
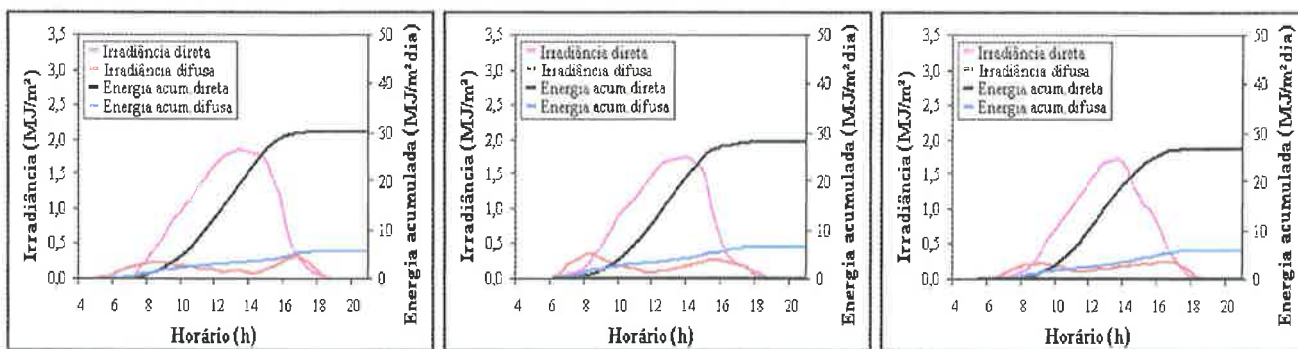
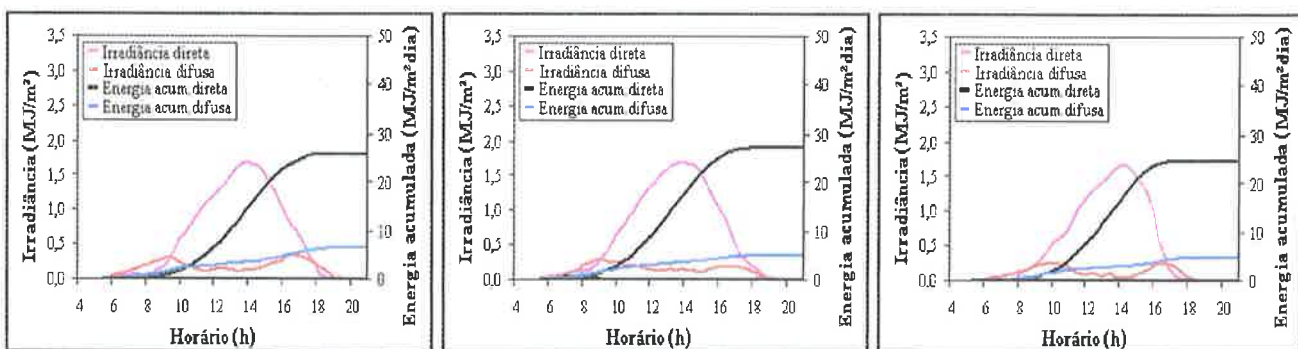


Figura 4.3. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de março.



a) Dia 11/04/06 (vazão de 2,0 g/s) b) Dia 12/04/06 (vazão de 2,5 g/s) c) Dia 24/04/06 (vazão de 3,0 g/s)

Figura 4.4. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de abril.



a) Dia 03/05/06 (vazão de 2,0 g/s) b) Dia 04/05/06 (vazão de 2,5 g/s) c) Dia 17/05/06 (vazão de 3,0 g/s)

Figura 4.5. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de maio.

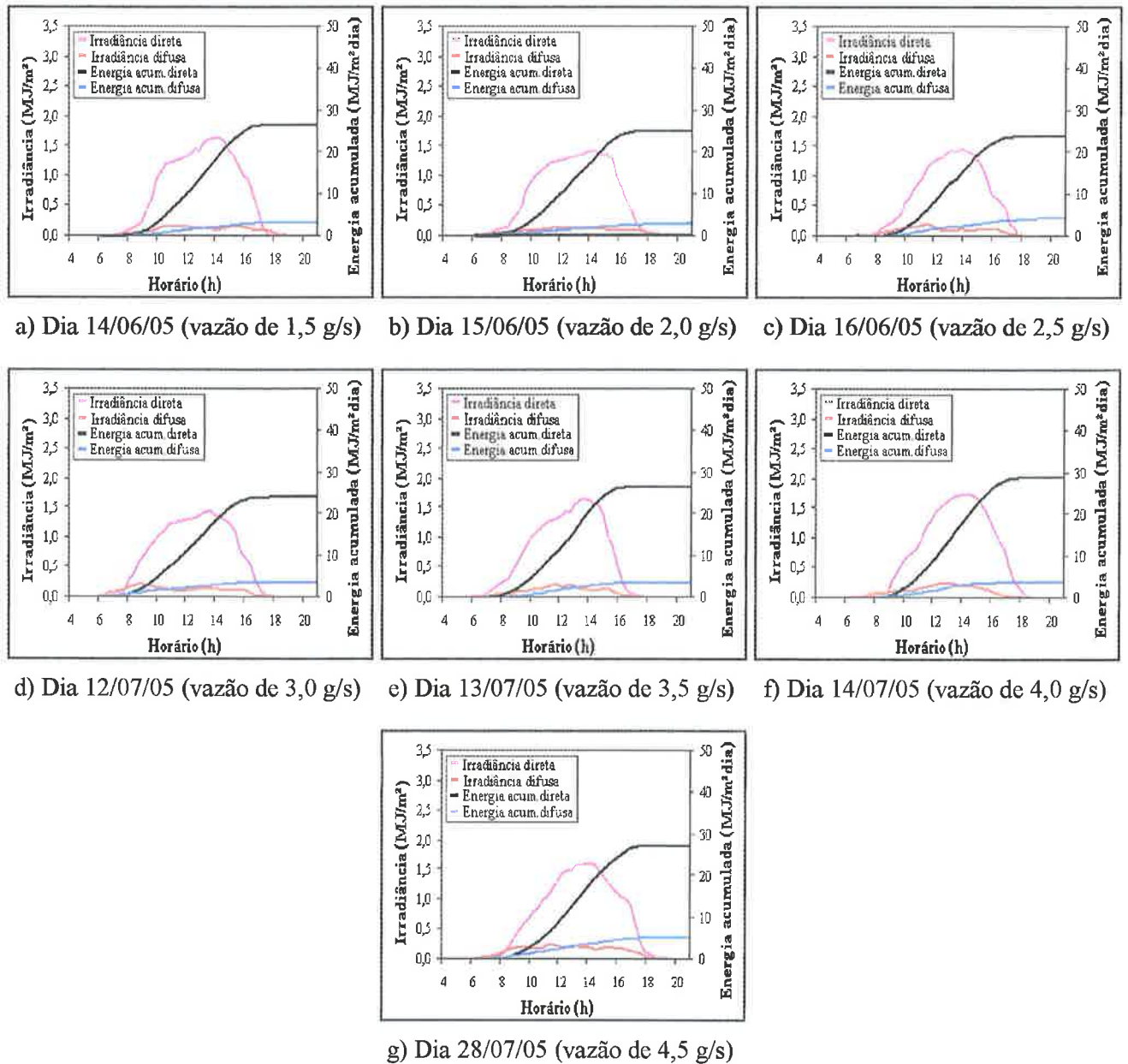


Figura 4.6. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos nos meses de junho e julho.

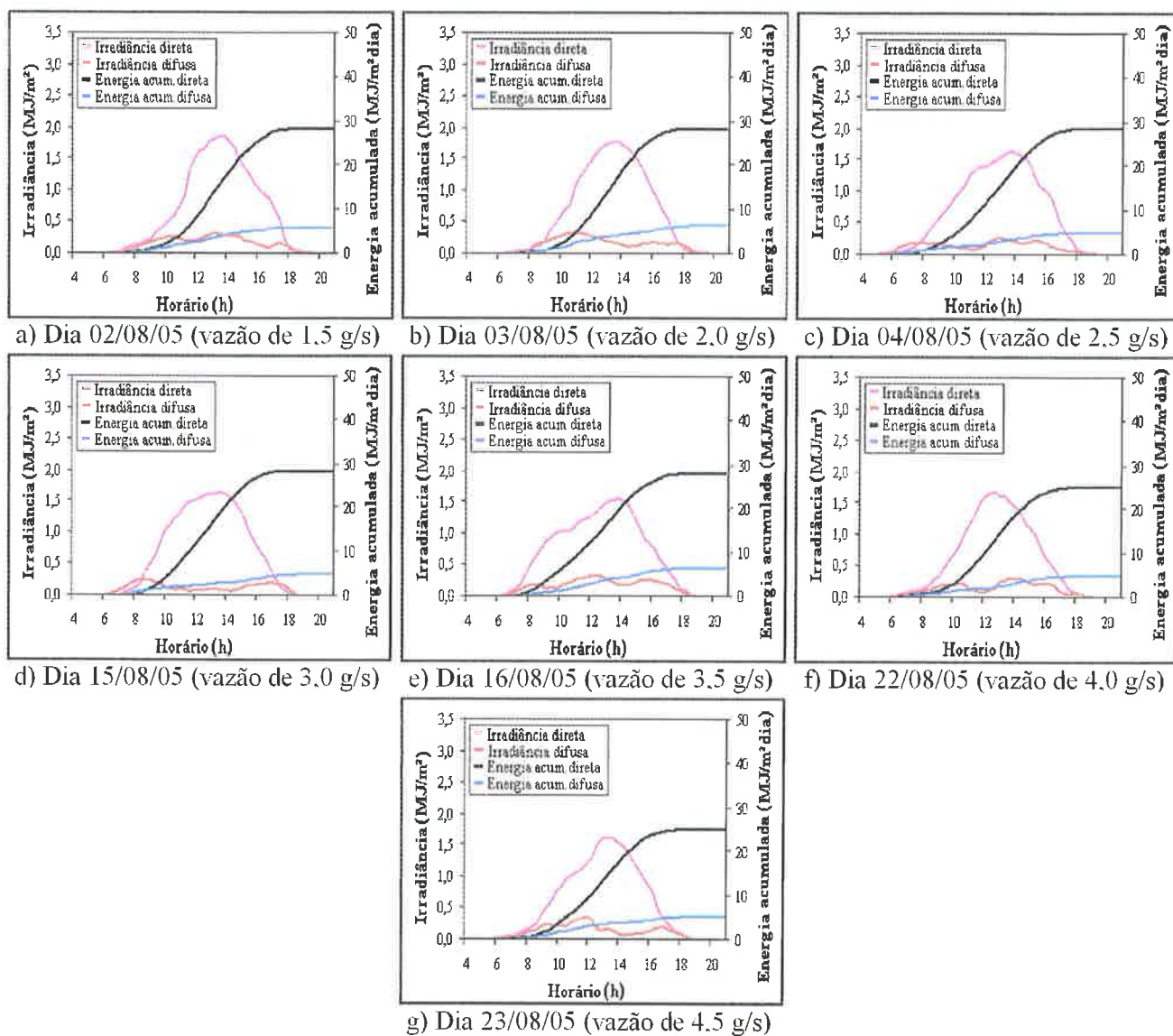
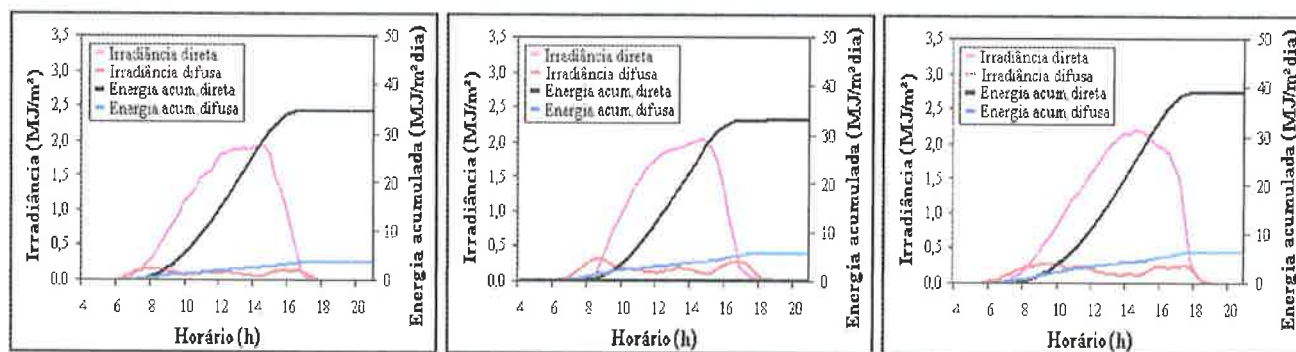


Figura 4.7. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos no mês de agosto.



a) Dia 05/09/06 (vazão de 2,0 g/s) b) Dia 11/09/06 (vazão de 2,5 g/s) c) Dia 13/09/06 (vazão de 3,0 g/s)

Figura 4.8. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias em que se realizaram os experimentos no mês de setembro.

Com exceção do dia 10/01/2006, Figura 4.2 (e), quando a partir das 13:00 horas o valor da irradiância difusa elevou-se drasticamente e durante os meses junho/julho de 2005, inverno atípico em São Paulo com baixa incidência de irradiância difusa, Figura 4.6, todas as outras figuras apresentaram comportamento de irradiâncias direta e difusa semelhante.

As energias direta e difusa acumuladas foram também próximas em cada período referido nas figuras, como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Energias direta e difusa acumuladas para todo o ano, nos períodos empregados para os testes utilizando o *procedimento 1*.

Período	Energia acumulada direta (MJ/m².dia)	Energia acumulada difusa (MJ/m².dia)
Outubro a fevereiro	39,7	6,8
Março	34,0	6,3
Abril	30,3	6,7
Maiο	28,0	5,8
Junho/julho	29,3	4,3
Agosto	29,7	6,0
Setembro	38,8	5,8

Nota-se que no período de outubro a fevereiro a energia acumulada direta foi mais elevada seguida dos meses de setembro, março, abril, agosto, junho/julho e maio. Já a energia acumulada difusa apresentou um valor mínimo de 4,3 MJ/m². dia para o período junho/julho e valores num intervalo mais estreito de 5,8 a 6,8 para os demais períodos.

Em cada período o comportamento das curvas foi tão parecido que, para efeito de cálculo, considerou-se que os dias foram semelhantes quanto aos valores de energias direta e difusa, acumuladas ao longo do dia.

As Tabelas 4.7 a 4.13 apresentam os resultados experimentais para todos os períodos de 9:00 as 16:00 horas nas vazões mencionadas nas tabelas.

Observando-se as referidas tabelas verifica-se que os maiores resultados de %Evap foram obtidos no período de outubro a fevereiro (período correspondente a primavera e verão) e os menores no período de junho/julho (período correspondente ao inverno). Isso era esperado devido a declinação solar, a variação da irradiância direta e difusa e da conseqüente diferença entre os valores de energias (direta e difusa) acumuladas correspondentes a estes períodos, além da influência das variáveis ambientais.

Tabela 4.7 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 3,25° e diferentes vazões), nos meses de outubro a fevereiro.

a) Dia 21/11/05 (vazão de 1,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,2	22,7	57,6	E	23	7,9
				S	30	
10:00	704,0	27,2	53,5	E	26	14,0
				S	31	
11:00	703,8	28,3	48,3	E	27	16,0
				S	31	
12:00	703,6	33,0	37,2	E	27	17,8
				S	34	
13:00	703,2	32,1	32,8	E	30	18,5
				S	35	
14:00	702,8	33,3	31,9	E	30	19,9
				S	36	
15:00	702,4	32,4	40,3	E	29	17,4
				S	34	
16:00	702,2	30,5	46,2	E	29	15,4
				S	32	

E - medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 22/11/05 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	702,6	24,2	56,7	E	23	8,5
				S	30	
10:00	702,6	28,1	55,3	E	26	13,9
				S	31	
11:00	702,2	29,3	54,1	E	27	16,1
				S	31	
12:00	701,6	30,7	40,9	E	27	18,0
				S	34	
13:00	701,4	32,4	37,3	E	30	19,5
				S	35	
14:00	701,2	32,7	40,3	E	30	21,0
				S	36	
15:00	701,2	29,1	57,2	E	29	18,5
				S	34	
16:00	701,1	26,2	67,4	E	29	16,4
				S	32	

E - medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 28/11/05 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,2	24,5	56,9	E	24	10,0
				S	28	
10:00	704,2	25,1	51,9	E	25	14,4
				S	30	
11:00	703,6	26,3	47,5	E	26	16,8
				S	33	
12:00	702,4	26,9	49,3	E	27	19,2
				S	36	
13:00	701,8	28,4	57,3	E	28	20,8
				S	37	
14:00	701,8	29,2	58,1	E	28	25,2
				S	35	
15:00	701,6	29,7	58,4	E	28	23,7
				S	32	
16:00	701,4	28,6	59,3	E	27	20,1
				S	31	

E - medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

d) Dia 09/01/06 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,4	28,4	53,7	E	26	8,9
				S	30	
10:00	704,4	32,1	52,3	E	27	11,2
				S	33	
11:00	704,2	32,9	49,7	E	28	12,2
				S	33	
12:00	704,2	33,7	40,3	E	30	14,9
				S	36	
13:00	704,2	33,9	40,7	E	30	17,1
				S	36	
14:00	704,0	33,5	46,5	E	30	19,4
				S	36	
15:00	704,0	32,6	47,6	E	30	18,5
				S	34	
16:00	704,0	32,1	51,3	E	29	16,3
				S	32	

E - medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Continua

Continuação

Tabela 4.7 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 3,25° e diferentes vazões), nos meses de outubro a fevereiro.

e) Dia 10/01/06 (vazão de 3,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	705,2	26,0	62,3	E 25	5,1
				S 29	
10:00	705,2	30,5	53,1	E 26	9,1
				S 32	
11:00	705,0	29,9	49,7	E 27	10,2
				S 33	
12:00	705,0	30,3	41,3	E 27	11,7
				S 35	
13:00	705,0	34,3	36,7	E 27	13,1
				S 35	
14:00	705,0	32,4	45,6	E 27	14,9
				S 35	
15:00	704,8	30,6	49,9	E 27	11,4
				S 35	
16:00	CHUVA	-	-	E -	-
				S -	

E – medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

f) Dia 11/01/06 (vazão de 4,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,2	29,7	53,9	E 26	4,7
				S 30	
10:00	706,2	30,2	49,3	E 26	7,4
				S 32	
11:00	706,0	31,4	48,1	E 26	9,4
				S 33	
12:00	705,8	32,3	42,7	E 26	10,5
				S 34	
13:00	705,8	33,8	36,5	E 26	11,5
				S 35	
14:00	705,8	32,6	44,7	E 26	12,8
				S 35	
15:00	705,4	30,3	49,6	E 26	10,0
				S 32	
16:00	705,4	29,8	57,2	E 26	9,3
				S 30	

E – medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

g) Dia 12/01/06 (vazão de 4,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	705,0	27,1	59,7	E 25	4,0
				S 30	
10:00	705,0	30,4	52,1	E 25	6,0
				S 31	
11:00	704,8	31,7	47,8	E 26	8,0
				S 33	
12:00	704,8	32,8	41,6	E 26	9,3
				S 35	
13:00	704,8	33,7	35,5	E 26	10,0
				S 36	
14:00	704,6	33,3	36,7	E 26	11,3
				S 36	
15:00	704,4	32,5	42,3	E 26	9,5
				S 34	
16:00	704,2	30,8	53,4	E 26	8,6
				S 32	

E – medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

Conclusão

Tabela 4.8 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 15° e diferentes vazões), no mês de março.

a) Dia 09/03/06 (vazão de 1,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,6	27,9	54,1	E	26	6,7
				S	30	
10:00	704,6	29,6	49,7	E	26	11,3
				S	32	
11:00	704,4	30,1	43,4	E	27	13,3
				S	34	
12:00	704,2	30,4	36,9	E	27	14,8
				S	35	
13:00	704,2	30,2	37,4	E	27	15,3
				S	35	
14:00	704,0	29,3	39,3	E	27	16,7
				S	34	
15:00	703,6	28,2	47,2	E	27	14,1
				S	32	
16:00	703,4	27,6	59,3	E	26	12,0
				S	31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 13/03/06 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,4	28,7	43,1	E	26	7,6
				S	29	
10:00	705,2	28,7	43,4	E	26	11,2
				S	28	
11:00	705,2	28,5	42,6	E	26	13,6
				S	30	
12:00	704,0	31,0	37,8	E	27	15,7
				S	34	
13:00	703,4	28,9	45,7	E	27	17,8
				S	35	
14:00	702,6	28,1	53,1	E	28	18,6
				S	33	
15:00	702,4	28,1	55,2	E	28	17,2
				S	32	
16:00	702,0	27,6	57,9	E	27	15,2
				S	31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 14/03/06 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,6	22,7	67,1	E	24	8,6
				S	27	
10:00	704,6	23,3	59,8	E	24	13,1
				S	29	
11:00	704,4	25,8	43,3	E	24	14,5
				S	31	
12:00	704,4	27,9	36,9	E	25	17,0
				S	32	
13:00	704,0	28,1	43,6	E	25	18,0
				S	30	
14:00	704,0	26,7	52,8	E	25	20,1
				S	31	
15:00	703,4	25,9	56,4	E	25	18,6
				S	30	
16:00	703,4	23,5	58,1	E	25	16,6
				S	28	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

d) Dia 15/03/06 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	705,2	28,7	63,5	E	26	7,3
				S	29	
10:00	705,0	29,5	57,1	E	27	10,3
				S	34	
11:00	704,6	29,7	52,3	E	26	11,3
				S	32	
12:00	704,4	30,1	51,7	E	27	13,9
				S	34	
13:00	704,0	30,6	56,5	E	27	16,2
				S	34	
14:00	703,8	29,5	57,3	E	27	17,8
				S	33	
15:00	703,7	28,7	58,1	E	27	15,9
				S	31	
16:00	703,5	27,4	61,3	E	27	14,2
				S	30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Continua

Continuação

Tabela 4.8 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 15° e diferentes vazões), no mês de março.

c) Dia 16/03/06 (vazão de 3,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	705,2	27,8	68,2	E	25	4,9
				S	29	
10:00	705,2	29,3	59,7	E	25	8,3
				S	31	
11:00	705,0	30,2	46,9	E	26	9,7
				S	33	
12:00	704,8	31,6	43,2	E	27	11,1
				S	35	
13:00	704,8	31,1	39,5	E	27	12,6
				S	35	
14:00	704,4	29,5	47,2	E	27	13,7
				S	34	
15:00	704,2	27,9	51,6	E	27	11,5
				S	33	
16:00	704,0	26,5	67,3	E	27	10,6
				S	32	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

f) Dia 20/03/06 (vazão de 4,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,0	27,5	60,3	E	26	2,5
				S	30	
10:00	704,0	29,1	53,7	E	26	4,0
				S	32	
11:00	703,8	30,3	45,3	E	27	6,2
				S	34	
12:00	703,6	30,7	39,6	E	27	9,0
				S	35	
13:00	703,4	30,0	37,5	E	27	10,0
				S	35	
14:00	703,4	29,6	46,6	E	27	10,5
				S	34	
15:00	703,0	28,3	53,2	E	27	9,8
				S	33	
16:00	703,0	27,4	62,3	E	27	7,2
				S	31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

g) Dia 21/03/06 (vazão de 4,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,6	26,1	56,7	E	24	3,1
				S	28	
10:00	704,6	28,7	53,6	E	25	4,0
				S	29	
11:00	704,2	29,1	49,9	E	26	6,6
				S	32	
12:00	704,2	30,5	39,6	E	26	7,3
				S	34	
13:00	704,0	30,6	38,1	E	27	8,9
				S	35	
14:00	704,0	30,1	37,7	E	27	9,3
				S	34	
15:00	703,6	28,5	47,3	E	27	8,6
				S	31	
16:00	703,4	24,7	58,5	E	27	7,1
				S	30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Conclusão

Tabela 4.9 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 31,5° e diferentes vazões), no mês de abril.

a) Dia 11/04/06 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	702,6	25,8	61,3	E 24	7,0
				S 30	
10:00	702,6	26,5	52,6	E 25	11,0
				S 31	
11:00	702,4	26,7	50,4	E 25	12,5
				S 31	
12:00	702,2	27,5	47,1	E 26	15,0
				S 32	
13:00	702,0	27,8	45,3	E 26	16,5
				S 32	
14:00	702,0	28,5	44,9	E 26	17,6
				S 33	
15:00	701,8	28,1	49,6	E 26	16,0
				S 32	
16:00	701,6	26,9	53,3	E 26	14,0
				S 31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 12/04/06 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	702,6	26,1	57,3	E 24	7,9
				S 29	
10:00	702,6	27,3	51,5	E 25	11,9
				S 30	
11:00	702,4	27,9	43,6	E 25	13,2
				S 30	
12:00	702,4	28,3	46,3	E 26	16,4
				S 31	
13:00	702,2	29,4	44,2	E 26	17,5
				S 33	
14:00	702,0	29,3	43,1	E 26	18,8
				S 33	
15:00	702,0	28,0	52,6	E 26	18,1
				S 32	
16:00	702,0	27,2	61,5	E 26	15,7
				S 30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 24/04/06 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,2	26,5	71,3	E 25	6,0
				S 29	
10:00	704,2	27,6	60,7	E 26	8,3
				S 30	
11:00	704,0	28,7	58,3	E 26	11,3
				S 30	
12:00	704,0	29,3	49,3	E 26	13,3
				S 31	
13:00	704,0	30,9	37,5	E 26	14,6
				S 34	
14:00	703,8	31,3	45,3	E 26	15,7
				S 34	
15:00	703,8	28,7	47,2	E 26	14,0
				S 33	
16:00	703,8	26,5	59,9	E 26	11,7
				S 30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Tabela 4.10 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 42° e diferentes vazões), no mês de maio.

a) Dia 03/05/06 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	704,0	19,2	69,2	E	21	6,0
				S	24	
10:00	703,8	21,4	61,6	E	21	7,5
				S	24	
11:00	703,8	24,3	53,1	E	22	10,5
				S	26	
12:00	703,6	25,2	40,2	E	22	12,5
				S	29	
13:00	703,6	28,3	35,6	E	21	14,5
				S	30	
14:00	703,4	27,4	43,9	E	21	15,0
				S	29	
15:00	703,4	26,2	52,7	E	21	13,0
				S	29	
16:00	703,4	24,6	57,3	E	21	9,5
				S	27	

E - medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 04/05/06 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	705,0	20,7	76,3	E	20	6,3
				S	24	
10:00	704,8	22,8	63,2	E	21	9,2
				S	26	
11:00	704,8	24,3	49,7	E	21	12,4
				S	30	
12:00	704,8	26,5	43,2	E	21	14,5
				S	31	
13:00	704,6	27,4	39,4	E	21	15,9
				S	31	
14:00	704,6	27,1	45,1	E	21	17,2
				S	30	
15:00	704,6	25,2	49,3	E	21	14,8
				S	30	
16:00	704,6	23,8	53,2	E	21	12,8
				S	28	

E - medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 17/05/06 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,2	17,9	68,7	E	16	5,3
				S	19	
10:00	706,0	21,7	55,6	E	19	8,3
				S	21	
11:00	704,8	23,9	48,1	E	19	11,0
				S	21	
12:00	704,8	24,2	45,2	E	19	12,0
				S	23	
13:00	704,6	26,9	39,8	E	19	13,7
				S	25	
14:00	703,6	27,1	43,7	E	21	14,6
				S	28	
15:00	703,0	25,8	52,4	E	21	12,6
				S	28	
16:00	703,0	24,3	55,0	E	21	10,7
				S	25	

E - medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

Tabela 4.11 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 46,75° e diferentes vazões), nos meses de junho e julho.

a) Dia 14/06/05 (vazão de 1,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,2	18,7	65,9	E	19	4,7
				S	21	
10:00	706,2	21,0	56,3	E	21	5,3
				S	25	
11:00	706,2	23,9	48,2	E	23	6,4
				S	28	
12:00	706,0	23,2	46,7	E	23	7,8
				S	28	
13:00	705,9	23,1	49,0	E	23	8,6
				S	30	
14:00	705,8	23,9	50,6	E	22	9,8
				S	30	
15:00	705,8	22,0	51,9	E	23	9,3
				S	30	
16:00	705,6	20,6	52,5	E	21	6,6
				S	27	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 15/06/05 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	707,5	18,9	64,3	E	21	5,1
				S	24	
10:00	707,3	21,2	55,2	E	21	5,7
				S	26	
11:00	707,3	21,9	47,6	E	22	6,9
				S	29	
12:00	707,0	24,3	47,2	E	21	9,5
				S	30	
13:00	706,2	22,1	48,3	E	21	11,5
				S	28	
14:00	706,0	21,8	50,6	E	21	12,1
				S	28	
15:00	705,8	21,5	51,1	E	21	9,6
				S	28	
16:00	705,8	20,7	56,4	E	21	7,6
				S	26	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 16/06/05 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,6	17,8	50,2	E	21	5,6
				S	24	
10:00	706,5	21,6	46,4	E	21	7,5
				S	27	
11:00	706,4	24,8	44,5	E	21	9,6
				S	30	
12:00	705,6	26,5	43,7	E	22	12,6
				S	31	
13:00	705,4	27,3	45,2	E	22	14,2
				S	32	
14:00	705,4	27,0	48,2	E	22	14,5
				S	31	
15:00	704,6	26,2	50,1	E	21	11,9
				S	29	
16:00	704,2	25,4	51,3	E	21	8,8
				S	28	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

d) Dia 12/07/05 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,7	21,5	57,2	E	19	4,3
				S	22	
10:00	708,5	21,0	55,7	E	19	5,5
				S	23	
11:00	708,4	22,0	40,9	E	20	7,1
				S	25	
12:00	708,4	23,0	39,8	E	21	8,4
				S	27	
13:00	708,4	24,0	41,6	E	21	10,3
				S	28	
14:00	708,3	24,0	44,2	E	21	10,7
				S	28	
15:00	708,1	21,5	45,6	E	20	9,1
				S	26	
16:00	708,1	20,0	48,1	E	19	7,3
				S	24	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Continua

Continuação

Tabela 4.11 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 46,75° e diferentes vazões), nos meses de junho e julho.

e) Dia 13/07/05 (vazão de 3,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	709,4	18,3	57,8	E 19	3,7
				S 20	
10:00	709,2	20,3	52,2	E 20	4,3
				S 21	
11:00	709,2	21,6	49,7	E 21	5,2
				S 23	
12:00	709,1	22,1	47,1	E 21	7,9
				S 27	
13:00	709,1	23,5	45,2	E 21	8,9
				S 28	
14:00	708,0	24,6	44,2	E 21	9,7
				S 29	
15:00	707,9	23,3	42,9	E 21	8,3
				S 38	
16:00	707,8	22,4	56,5	E 21	6,3
				S 24	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

f) Dia 14/07/05 (vazão de 4,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,6	20,2	56,7	E 19	2,4
				S 21	
10:00	708,6	21,3	51,8	E 20	3,7
				S 23	
11:00	708,5	22,4	49,9	E 20	4,4
				S 25	
12:00	708,3	22,8	47,3	E 21	5,1
				S 26	
13:00	708,1	23,2	45,2	E 21	8,3
				S 29	
14:00	708,1	23,0	44,8	E 21	9,1
				S 28	
15:00	707,8	22,7	44,6	E 21	8,1
				S 28	
16:00	707,5	22,1	45,5	E 21	5,9
				S 25	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

g) Dia 28/07/05 (vazão de 4,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,8	21,2	54,7	E 18	2,2
				S 23	
10:00	708,6	22,7	52,5	E 18	3,1
				S 24	
11:00	708,4	23,4	49,9	E 19	4,0
				S 26	
12:00	708,4	25,1	51,4	E 19	5,1
				S 29	
13:00	708,2	26,3	50,6	E 20	7,8
				S 29	
14:00	708,2	26,5	50,9	E 20	8,5
				S 32	
15:00	708,2	25,7	51,3	E 20	8,0
				S 31	
16:00	708,2	24,5	52,7	E 20	5,4
				S 28	

E – medição realizada na entrada da placa plana

Conclusão

Tabela 4.12 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 36,5° e diferentes vazões), no mês de agosto.

a) Dia 02/08/05 (vazão de 1,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,6	21,6	52,3	E	18	5,3
				S	21	
10:00	708,6	22,7	49,0	E	19	10,7
				S	21	
11:00	708,4	23,6	45,6	E	19	11,2
				S	28	
12:00	708,4	24,1	41,7	E	20	12,0
				S	29	
13:00	708,2	25,3	39,6	E	20	11,9
				S	31	
14:00	708,0	25,2	36,3	E	20	12,0
				S	31	
15:00	707,7	25,3	36,6	E	22	9,9
				S	32	
16:00	707,5	25,1	39,2	E	22	5,3
				S	31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

b) Dia 03/08/05 (vazão de 2,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,6	22,3	49,2	E	21	5,1
				S	24	
10:00	708,4	23,7	43,7	E	21	5,7
				S	26	
11:00	708,4	24,2	38,4	E	22	6,9
				S	29	
12:00	708,2	25,1	35,5	E	21	9,5
				S	30	
13:00	708,1	25,2	37,2	E	21	11,5
				S	28	
14:00	708,1	24,9	39,7	E	21	12,1
				S	28	
15:00	707,8	24,2	40,6	E	21	9,6
				S	28	
16:00	707,6	23,2	42,3	E	21	7,6
				S	26	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 04/08/05 (vazão de 2,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,5	21,7	51,7	E	21	5,6
				S	24	
10:00	708,5	22,3	49,6	E	21	7,5
				S	27	
11:00	708,4	23,8	45,4	E	21	9,6
				S	30	
12:00	708,4	24,3	39,1	E	22	12,6
				S	31	
13:00	708,4	25,1	36,9	E	22	14,2
				S	32	
14:00	708,1	25,3	36,2	E	22	14,5
				S	31	
15:00	708,1	25,0	39,5	E	21	11,9
				S	29	
16:00	707,9	24,8	40,7	E	21	8,8
				S	28	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

d) Dia 15/08/05 (vazão de 3,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,6	20,2	53,2	E	18	5,1
				S	21	
10:00	708,6	21,3	49,6	E	19	7,1
				S	21	
11:00	708,4	25,4	45,2	E	19	9,7
				S	28	
12:00	708,4	26,2	44,7	E	20	12,0
				S	29	
13:00	708,4	26,5	43,6	E	20	12,4
				S	31	
14:00	708,2	25,7	42,1	E	20	12,7
				S	30	
15:00	708,2	25,3	45,3	E	21	12,1
				S	31	
16:00	708,2	24,8	46,5	E	21	11,1
				S	30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Continua

Continuação

Tabela 4.12 - Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 36,5° e diferentes vazões), no mês de agosto.

e) Dia 16/08/05 (vazão de 3,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	708,6	20,9	77,7	E 19	3,4
				S 20	
10:00	708,6	21,7	70,9	E 19	5,2
				S 21	
11:00	708,4	25,2	57,1	E 19	9,2
				S 29	
12:00	708,0	27,4	50,9	E 20	10,9
				S 30	
13:00	708,0	28,6	45,0	E 20	11,5
				S 31	
14:00	707,8	28,7	43,3	E 20	12,0
				S 31	
15:00	707,6	28,4	45,6	E 20	11,1
				S 30	
16:00	707,4	27,8	47,9	E 21	10,6
				S 31	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

f) Dia 22/08/05 (vazão de 4,0 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	707,2	23,1	59,4	E 19	3,2
				S 21	
10:00	707,2	23,7	55,7	E 19	4,5
				S 21	
11:00	707,2	24,4	50,1	E 19	6,9
				S 26	
12:00	707,0	27,3	39,4	E 20	9,8
				S 31	
13:00	706,8	28,1	37,8	E 20	10,5
				S 31	
14:00	706,5	28,9	35,5	E 20	10,8
				S 31	
15:00	706,2	28,2	39,3	E 21	10,3
				S 31	
16:00	706,0	27,4	43,7	E 21	9,5
				S 30	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

g) Dia 28/07/05 (vazão de 4,5 g/s)

Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	707,2	22,7	59,1	E 18	3,3
				S 23	
10:00	707,2	23,9	55,3	E 18	4,0
				S 24	
11:00	707,2	24,9	50,3	E 19	5,7
				S 26	
12:00	707,0	27,3	39,9	E 19	7,6
				S 29	
13:00	706,8	28,1	37,8	E 20	9,3
				S 29	
14:00	706,6	28,9	33,9	E 20	9,8
				S 32	
15:00	706,2	28,3	39,7	E 20	9,1
				S 31	
16:00	706,0	27,7	43,3	E 20	8,9
				S 28	

E – medição realizada na entrada da placa plana

S - medição realizada na saída da placa plana.

Conclusão

Tabela 4.13 --Resultados experimentais obtidos com o *procedimento 1* (inclinação de 20° e diferentes vazões), no mês de setembro.

a) Dia 05/09/06 (vazão de 2,0 g/s)							b) Dia 11/09/06 (vazão de 2,5 g/s)						
Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)	Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,4	21,2	55,3	E	21	6,5	9:00	707,2	20,9	54,1	E	21	7,6
				S	25						S	26	
10:00	706,4	23,1	47,2	E	21	12,1	10:00	707,2	23,7	46,9	E	21	13,6
				S	29						S	30	
11:00	706,2	24,2	41,4	E	22	14,6	11:00	707,0	25,1	40,5	E	22	15,2
				S	33						S	32	
12:00	706,2	26,3	38,5	E	23	18,0	12:00	706,0	26,9	38,4	E	23	18,4
				S	36						S	36	
13:00	706,2	28,9	35,3	E	23	18,6	13:00	706,6	29,3	34,7	E	23	20,4
				S	37						S	36	
14:00	706,0	30,2	30,1	E	23	20,5	14:00	706,6	31,2	31,8	E	23	22,4
				S	37						S	36	
15:00	706,0	28,7	36,9	E	23	17,6	15:00	706,4	28,6	37,3	E	23	20,8
				S	37						S	37	
16:00	706,0	27,5	43,7	E	23	14,0	16:00	706,2	26,8	45,2	E	23	18,8
				S	35						S	35	

E – medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

c) Dia 13/09/06 (vazão de 3,0 g/s)						
Horário	P _{amb} (mm Hg)	T _{amb} (°C)	UR (%)		Temp (°C)	%Evap (%)
9:00	706,4	19,9	52,3	E	20	7,3
				S	24	
10:00	706,4	23,2	49,6	E	21	10,3
				S	29	
11:00	706,3	25,7	45,4	E	22	11,9
				S	33	
12:00	706,3	27,3	38,7	E	23	13,5
				S	35	
13:00	706,0	30,1	36,2	E	24	16,2
				S	35	
14:00	706,0	31,7	34,5	E	24	17,5
				S	36	
15:00	706,0	30,8	39,3	E	24	15,5
				S	35	
16:00	705,4	28,6	47,2	E	24	13,2
				S	33	

E – medição realizada na entrada da placa plana
S - medição realizada na saída da placa plana.

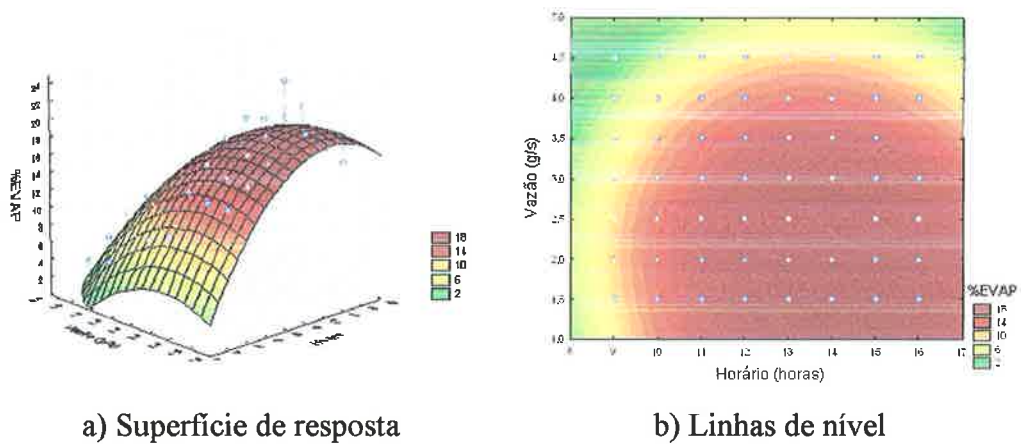
Com os dados das tabelas foi feita regressão e os modelos obtidos para cada período estão na coluna 2 da Tabela 4.14. Nesses modelos a vazão foi designada por V e o horário por H. Os parâmetros de ajuste dos modelos estão nas colunas 3 e 4.

Tabela 4.14 – Modelos de regressão para os períodos estudados com os respectivos parâmetros de ajuste.

Período	Modelo empírico	Coefficiente de determinação R ²	Variância explicada
Outubro a fevereiro	%EVAP = $-68,09 + 11,62 \times V + 6,95 \times H - 0,40 \times V^2 - 1,33 \times H^2 - 0,17 \times V \times H$	0,93001	86,491%
Março	%EVAP = $-66,35 + 10,97 \times V + 7,39 \times H - 0,39 \times V^2 - 1,54 \times H^2 - 0,07 \times V \times H$	0,95001	90,253%
Abril	%EVAP = $-116,50 + 12,17 \times V + 42,46 \times H - 0,43 \times V^2 - 8,62 \times H^2 - 0,09 \times V \times H$	0,98512	97,046%
Maior	%EVAP = $-114,16 + 12,58 \times V + 36,20 \times H - 0,47 \times V^2 - 7,37 \times H^2 - 0,05 \times V \times H$	0,97349	94,769%
Junho/julho	%EVAP = $-48,33 + 8,01 \times V + 3,79 \times H - 0,30 \times V^2 - 0,92 \times H^2 + 0,06 \times V \times H$	0,87259	76,141%
Agosto	%EVAP = $-51,27 + 9,34 \times V + 1,71 \times H - 0,37 \times V^2 - 0,99 \times H^2 + 0,23 \times V \times H$	0,93081	86,641%
Setembro	%EVAP = $-152,51 + 15,02 \times V + 58,52 \times H - 0,54 \times V^2 - 11,77 \times H^2 - 0,14 \times V \times H$	0,96663	93,438%

Observa-se pelos modelos que as influencias da vazão e do horário são semelhantes em forma e em alguns períodos com coeficientes muito parecidos, tais como: outubro a fevereiro com o mês de março; abril e maio; junho/julho e agosto. Os modelos mostraram-se bem ajustados levando em conta as influências das variáveis externas (temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do vento).

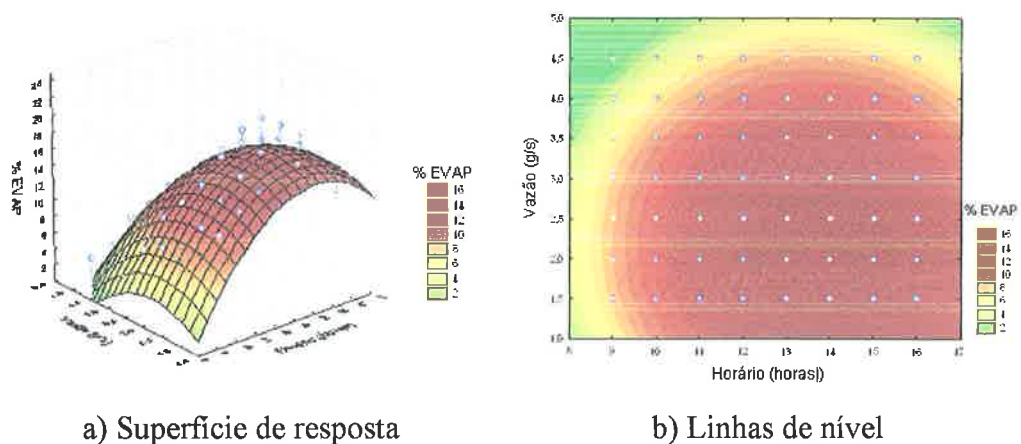
As superfícies de resposta com as respectivas linhas de nível para todos os períodos, foram construídas para os modelos da Tabela 4.14 e estão apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.15.



a) Superfície de resposta

b) Linhas de nível

Figura 4.9 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o período de outubro a fevereiro



a) Superfície de resposta

b) Linhas de nível

Figura 4.10 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de março

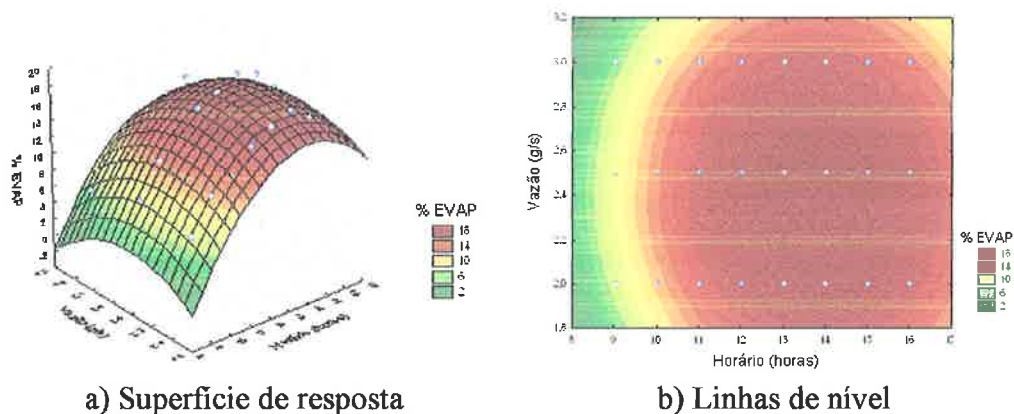


Figura 4.11 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de abril

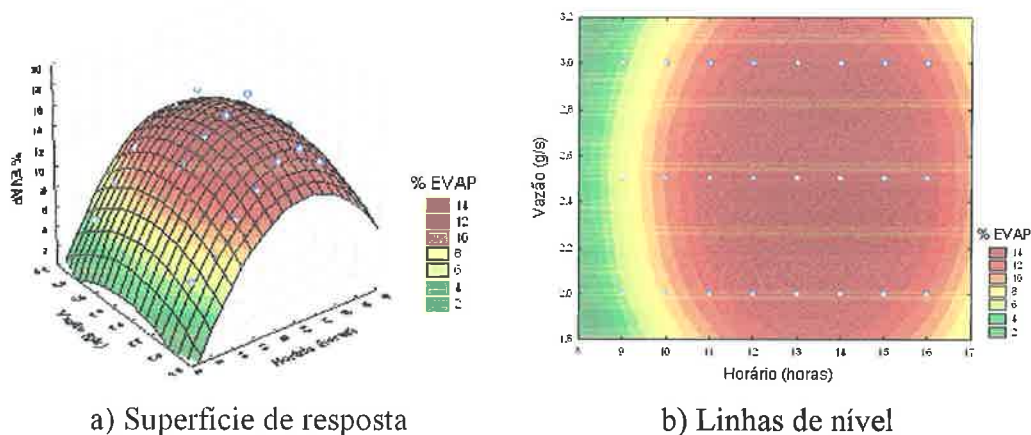


Figura 4.12 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de maio

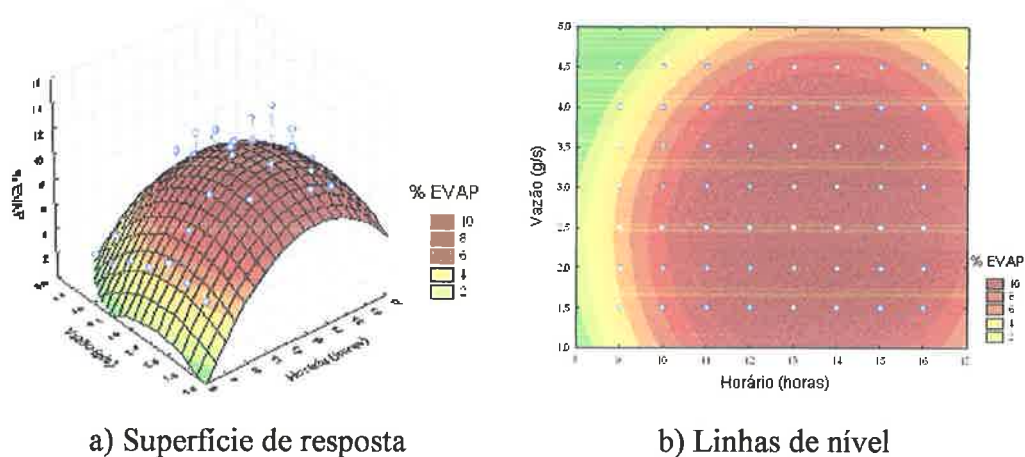


Figura 4.13 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para junho e julho.

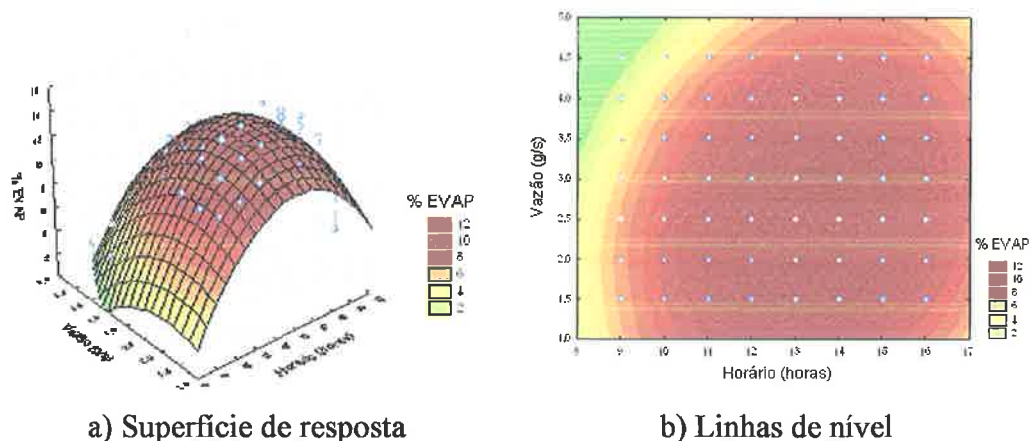


Figura 4.14 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de agosto.

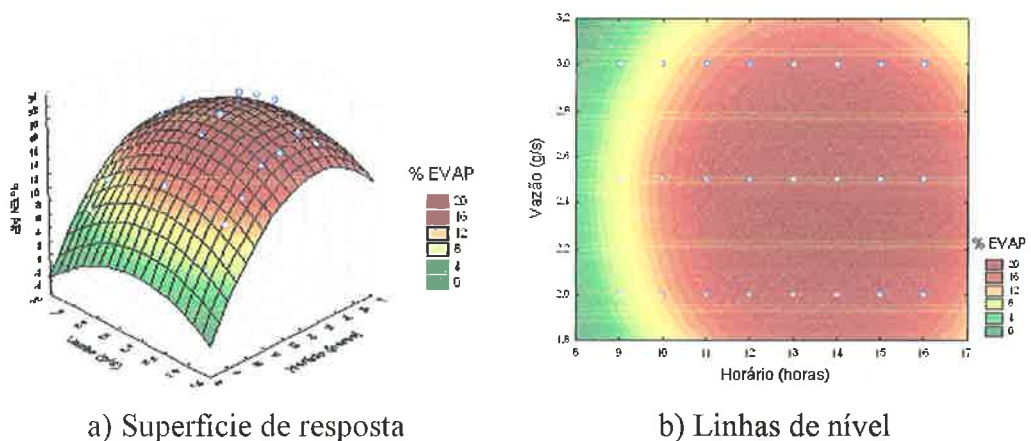


Figura 4.15 Superfície de resposta para o modelo da %Evap em função da vazão e do horário para o mês de setembro.

As figuras mostram que existe um ponto de máximo em todos os modelos. Esse ponto está sempre no intervalo de vazão entre 1,5 e 2,5 g/s e entre 13:00 e 14:00 horas. Poder-se-ia estimar os pontos de máximo em cada modelo, porém achou-se desnecessário pela proximidade de vazões e de horários, para os períodos estudados. Tomou-se como situação ótima geral para o *procedimento 1*, a vazão de 2,5 g/s por encontrar-se no intervalo mencionado e pela estabilidade do filme que escoar sobre a superfície do coletor, ao longo de todo o dia.

4.4.2 Resultados experimentais, seguindo o procedimento 2

No *procedimento 2* a placa plana foi fixada no valor da média anual de inclinação para a cidade de São Paulo ($20,5^\circ$) e a vazão foi fixada no valor em que se obtiveram maiores valores de %Evap no *procedimento 1*, ou seja a vazão mantida em 2,5 g/s para todos os meses do ano. Esse procedimento visou a verificação de quanto o valor da taxa de evaporação foi afetado se a inclinação fosse mantida constante ($20,5^\circ$) em relação ao ajuste mensal da inclinação de acordo com a Tabela 4.4.

Os resultados obtidos no dia 12/01/2006, seguindo o *procedimento 2* para os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, podem ser visualizados na Figura 4.16, juntamente com os valores obtidos com a inclinação de $3,25^\circ$, para verificar a discrepância de valores.

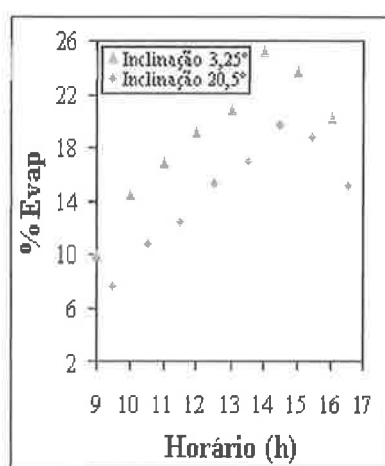


Figura 4.16. Efeito da inclinação da placa na %Evap nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro.

A partir da Figura 4.16 observou-se nitidamente que os valores mantendo a inclinação de $3,25^\circ$ foram mais elevados do que os valores obtidos para o equipamento fixado em uma

mesma inclinação durante o ano todo (inclinação média de $20,5^\circ$) apresentando uma diferença média de 29,7%, ressaltando a importância de se alterar a inclinação da placa mensalmente.

Os valores de irradiância global e difusa obtidos no site do INPE, para o dia 12/01/2006, podem ser visualizados na Figura 4.17, juntamente com valores de irradiância direta e de energias acumuladas global e difusa, ao longo do dia.

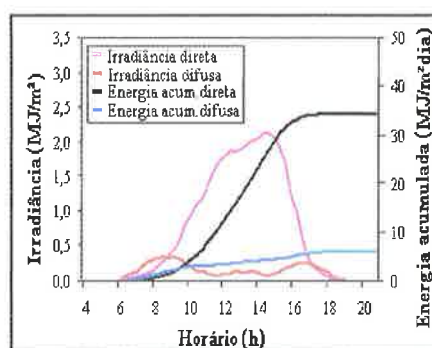


Figura 4.17. Irradiância solar e energia acumulada, no dia 12/01/06.

Na Figura 4.17 observou-se uma elevação dos valores de irradiância direta por volta das 11:00 horas e um ponto de máximo por volta das 14:00 horas e que os valores de irradiância difusa apresentaram valores mais elevados nas primeiras horas da manhã e no entardecer, ultrapassando o valor de irradiância direta.

Os resultados empregando o *procedimento 2*, para o mês de março podem ser vistos na Figura 4.18, juntamente com os resultados obtidos com a inclinação de 15° , inclinação calculada para o referido mês.

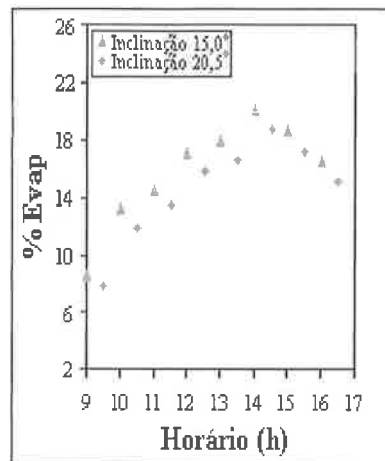


Figura 4.18. Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de março.

A partir da figura observou-se que os valores mantendo a inclinação de 15° foram superiores aos valores obtidos para o equipamento fixado na inclinação média de $20,5^\circ$, mas a discrepância foi menos acentuada apresentando uma diferença média dos valores, em torno de 8,0%. Essa discrepância pode ser explicada pelo fato da inclinação calculada para o mês de março (15°) encontrar-se próxima do valor da média anual ($20,5^\circ$), acarretando menores diferenças de valores de %Evap obtidas com essas inclinações.

A Figura 4.19 apresenta a comparação dos resultados para o mês de abril, com a placa fixada em $31,5^\circ$, com os resultados empregando o *procedimento 2* (inclinação de $20,5^\circ$). Em ambos os casos a vazão foi de 2,5 g/s.

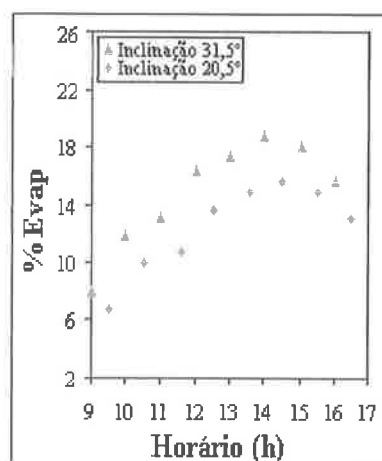


Figura 4.19. Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de abril.

A partir da figura observou-se que os valores mantendo a inclinação de $31,5^\circ$ são mais elevados do que os valores obtidos para a placa fixada na inclinação média anual de $20,5^\circ$. A diferença média apresentada foi de 20,2%, ressaltando a importância de se alterar a inclinação da placa mensalmente. Nota-se ainda, que a discrepância de valores aumenta quando comparado com o mês de março, pois a inclinação de $31,5^\circ$ está mais distante da média anual do que a inclinação de 15° referente ao mês de março.

Nota-se que até o dia 21 do mês de março ocorre o verão, na cidade de São Paulo, e nesta estação do ano, a incidência dos raios solares apresenta um ângulo de inclinação por volta de $(-23,5^\circ)$, como explicado no item 2.3. Entretanto, no mês de abril ocorre o outono e nesta estação do ano os raios solares incidem perpendicularmente ao Equador e o valor da inclinação da placa plana deve ser superior ao valor de inclinação para o mês de março.

Figura 4.20 apresenta a comparação dos resultados realizados no mês de maio, seguindo o *procedimento 2*, com inclinação da placa no valor médio anual e dos resultados obtidos com a inclinação de 42° (valor calculado para maio), ambos com a mesma vazão 2,5 g/s.

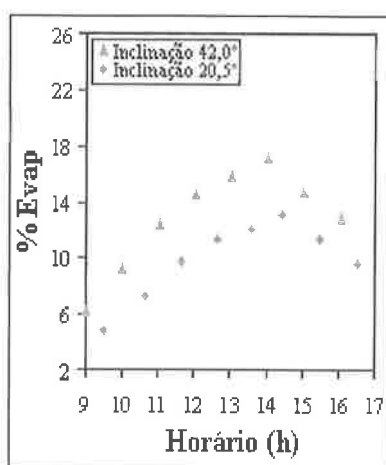


Figura 4.20. Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de maio.

Na figura observou-se que os valores obtidos mantendo a inclinação da placa em $42,0^\circ$ são mais elevados do que os valores obtidos se a placa fosse fixada na inclinação média anual. A diferença média apresentada foi de 31,4%.

A Figura 4.21 mostra a comparação dos resultados obtidos nos meses de junho e julho, para inclinação de $46,75^\circ$ (inclinação média entre as inclinações calculadas para junho e julho) com os resultados seguindo o *procedimento 2* para a inclinação fixa de $20,5^\circ$. Para ambos os casos a vazão foi mantida em 2,5g/s.

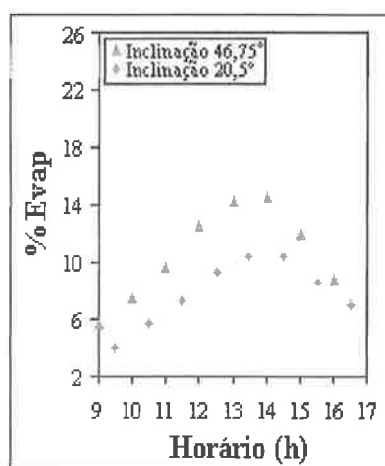


Figura 4.21. Efeito da inclinação da placa na %Evap nos meses de junho e julho.

A partir da figura vê-se nitidamente que os valores mantendo a inclinação em $46,75^\circ$ são mais elevados do que os valores obtidos para a placa fixada no valor médio anual, apresentando uma diferença média de 36,4%.

Os resultados obtidos no experimento realizado no mês de agosto, seguindo o *procedimento 2*, foram comparados com os resultados mantendo a inclinação em $36,5^\circ$ (valor calculado). Essa comparação pode ser visualizada na Figura 4.22.

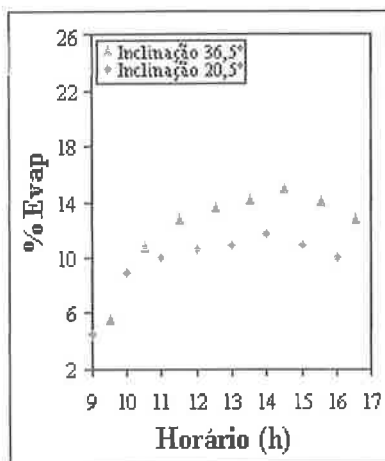


Figura 4.22. Efeito da inclinação da placa na %Evap nos mês de agosto.

Os resultados obtidos com a inclinação de $36,5^\circ$ são superiores aos valores obtidos com a placa fixada na inclinação média anual, apresentando uma diferença média de 28,4%

No mês de setembro a inclinação determinada pelo *procedimento 2* ($20,5^\circ$) foi muito próxima da inclinação calculada $20,0^\circ$ e espera-se que os pontos não apresentem uma grande discrepância. Os resultados obtidos no com inclinação de $20,5^\circ$ podem ser vistos na Figura 4.23, juntamente com os resultados obtidos com a inclinação de 20° .

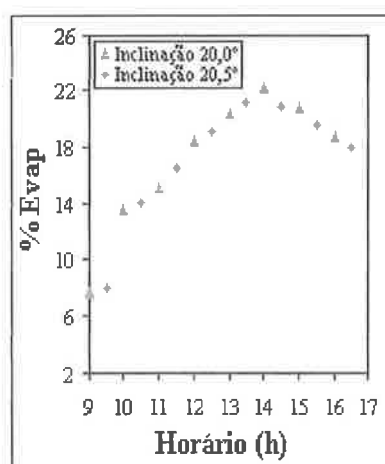


Figura 4.23. Efeito da inclinação da placa na %Evap no mês de setembro.

A figura mostrou que os valores apresentam resultados muito próximos, como era esperado, com uma diferença média de 1,1%.

Exceto para o mês de setembro onde a discrepância foi muito baixa, todos os resultados experimentais mostraram a importância do ajuste mensal da inclinação da placa conforme a Tabela 4.4, pois as diferenças de valores de %Evap quando não se realiza esse ajuste podem ser até 36,4% inferiores.

4.4.3 Resultados experimentais com o pré-aquecimento da alimentação

Os experimentos com pré-aquecimento da alimentação foram realizados nos meses de maio, junho/julho e agosto de 2006, com a inclinação no valor respectivo de cada mês e com a vazão mantida em 2,5 g/s. Estes resultados bem como os obtidos sem pré-aquecimento estão apresentados nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26.

Os resultados obtidos com o pré-aquecimento da alimentação apresentaram uma diferença média de 6,6%, 5,7% e 9,6% superiores aos resultados obtidos sem pré-aquecimento, respectivamente para os meses de maio, junho/julho e agosto. Portanto, o pré-aquecimento da alimentação recupera uma considerável parcela da energia e isso se reflete no aumento da temperatura da alimentação com conseqüente elevação da concentração de saída da solução.

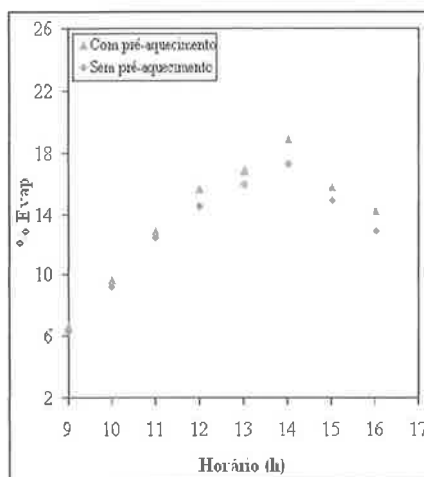


Figura 4.24. Resultados obtidos no mês de maio, com pré-aquecimento da alimentação.

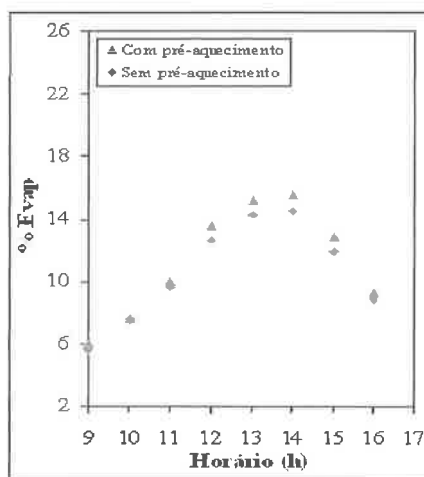


Figura 4.25. Resultados obtidos no mês de junho/julho, com e sem pré-aquecimento da alimentação.

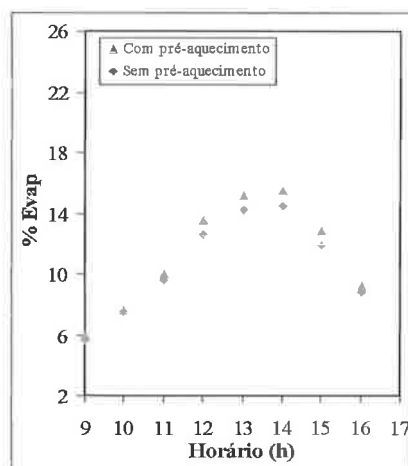


Figura 4.26. Resultados obtidos nos agosto, com e sem pré-aquecimento da alimentação.

Os valores de irradiância direta e difusa obtidos no site do INPE, para os dias 29/05/2006, 12/06/2006 e 22/08/2006 podem ser visualizados na Figura 4.27, juntamente com valores de energia acumulada global e difusa, ao longo de cada dia.

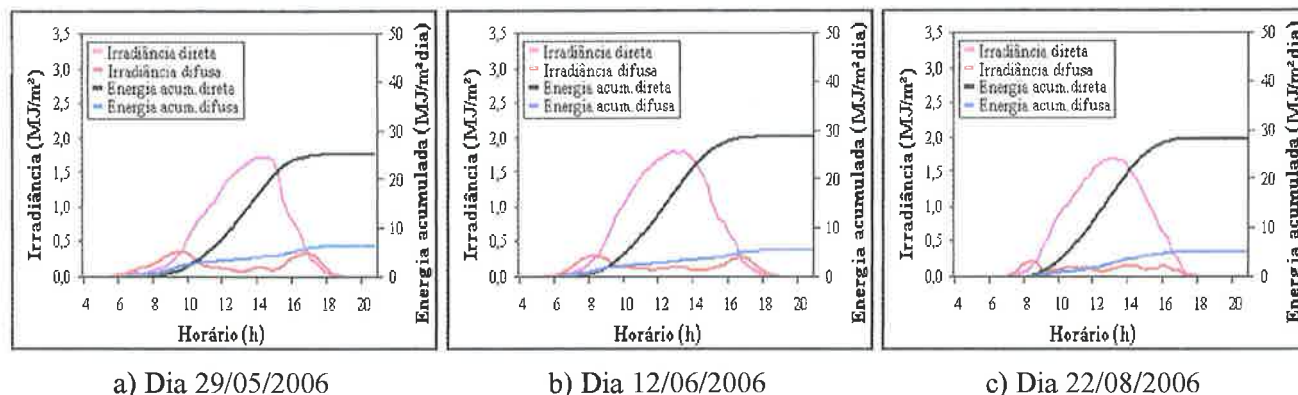


Figura 4.27. Irradiância solar e energia acumulada, nos dias que se realizaram os experimentos com pré-aquecimento da alimentação.

4.4.4 Resultados experimentais da evaporação da solução de NaCl (5% em massa) com o pré-aquecimento da alimentação

No dia 19/06/2006 foi realizado um experimento utilizando como alimentação uma solução salina preparada conforme o procedimento descrito no item 3.3, com pré-aquecimento da alimentação, inclinação da placa em $46,75^\circ$ e vazão de 2,5 g/s. Os resultados obtidos podem ser vistos, na Figura 4.28.

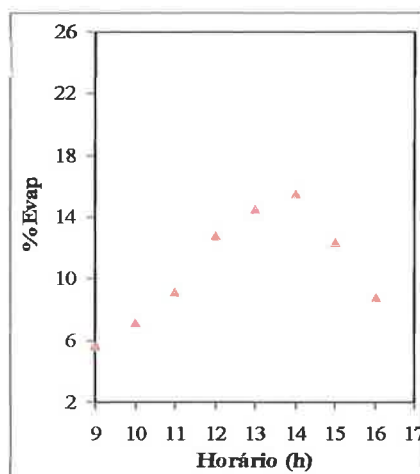


Figura 4.28. Valores de %Evap de uma solução de NaCl com 5% em massa, obtidos com inclinação de $46,75^\circ$ e vazão de 2,5 g/s.

Observa-se que os valores de porcentagem de evaporação da solução salina apresentaram um comportamento semelhante ao comportamento quando se utilizou água como fluido de processo, em que os valores de %Evap atingiram o máximo por volta das 14:00 horas.

Os valores de irradiância direta e difusa, para o dia 19/06/2006, podem ser visualizados na Figura 4.29, juntamente com valores de energia acumulada global e difusa, ao longo do dia.

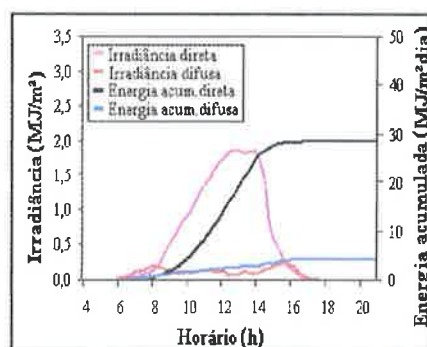


Figura 4.29. Irradiância solar e energia acumulada, no dia 19/06/06.

Na Figura 4.29 nota-se uma região de máximo por volta das 14:00 horas e que os valores de irradiância difusa apresentam-se mais elevados nas primeiras horas da manhã e no entardecer, ultrapassando levemente o valor de irradiância direta. Verificou-se, também, que os menores

valores de irradiância difusa ocorreram juntamente com os maiores valores de irradiância direta.

Os valores da concentração final da solução salina na saída da placa plana foram calculados com o auxílio da equação (3.4), a partir dos dados experimentais, medidos de hora em hora, correspondentes aos valores da vazão mássica da solução na entrada (W_{se}) e na saída da placa plana (W_{sf}) e da concentração inicial (C_{is}) 5% em massa. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15- Concentração final da solução salina ao longo de um experimento.

Horário (horas)	Concentração final (% em massa)
9:00	5,30
10:00	5,39
11:00	5,51
12:00	5,73
13:00	5,84
14:00	5,92
15:00	5,71
16:00	5,48

4.4.5 Comparação dos resultados experimentais de %Evap da solução de NaCl (5% em massa) com resultados de %Evap da água

A comparação dos resultados de porcentagem de evaporação quando se utilizou água como fluido de processo, com e sem pré-aquecimento da alimentação, com os resultados obtidos quando para a solução de NaCl com 5% em massa, pré-aquecida, pode ser visualizada na Figura 4.30.

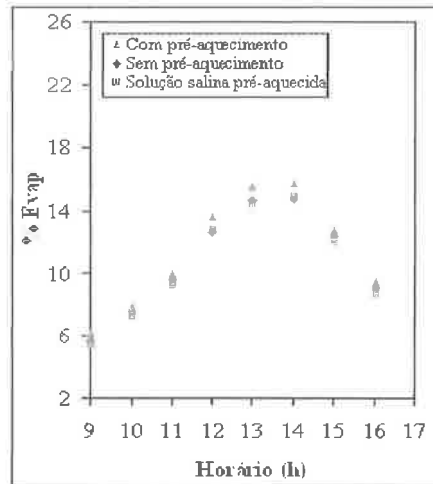


Figura 4.30. Comparação dos valores de %Evap da água com e sem pré-aquecimento e de uma solução salina de NaCl com 5% em massa, pré-aquecida.

Como esperado, os resultados obtidos utilizando água como fluido de processo foram superiores aos obtidos quando se utilizou a solução de NaCl, devido a pressão de vapor da água ser superior a pressão de vapor da solução.

4.5. Resultados do Transporte de Calor e de Massa em Evaporadores Solares

Com o uso das equações descritas no item 2.6 e dos valores de algumas condições meteorológicas da cidade de São Paulo (obtidas pelo site do INPE) foi possível a obtenção de valores para realizar uma comparação com resultados obtidos por Sartori (1996) e pelos autores Srithar e Mani (2003).

4.5.1 Comparação de valores de transporte de calor e massa obtidos neste trabalho com valores de Sartori (1996)

Como os resultados apresentados pelo autor, foram para o mês de julho, faz-se necessário uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho também para o mês de julho. Para tanto, aplicou-se as equações de transporte de calor por evaporação (q_{ew}), irradiância (q_{rw}), convecção (q_{cw}) e condução (q_{kw}) e para a taxa de evaporação (\dot{m}_h) para o ensaio que obteve melhores taxas de evaporação no mês julho (inclinação de $46,75^\circ$ e vazão de $2,5\text{g/s}$). Ambos os resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.31 e 4.32.

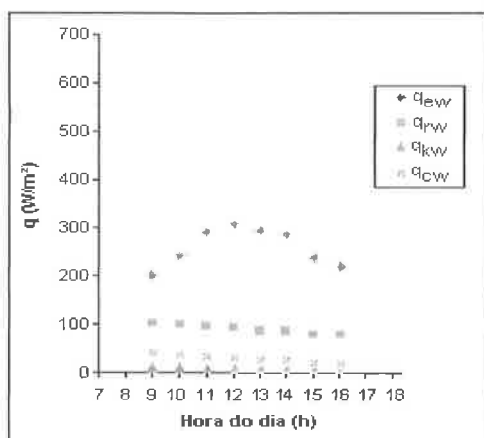


Figura 4.31 Transporte de calor x tempo, para o mês de julho.

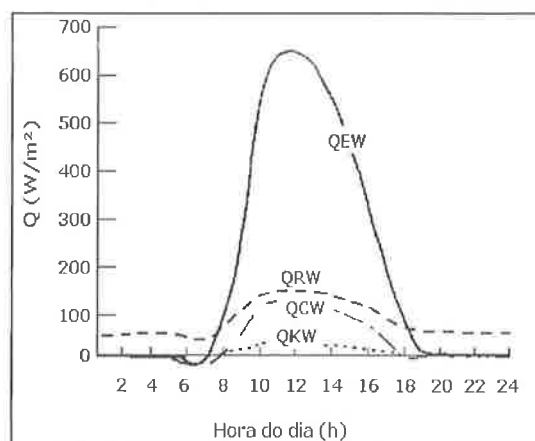


Figura 4.32. Transporte de calor x tempo, para o mês de julho, Sartori (1996).

Para uma melhor visualização os dois gráficos foram colocados na mesma escala de valores. Nota-se que os experimentos realizados neste trabalho tiveram a duração das 9:00 às 16:00 horas, pois neste intervalo ocorrem os maiores valores de taxa de evaporação, enquanto os experimentos realizados por Sartori (1996), tiveram uma duração de 24 horas.

Comparando-se as Figuras 4.31 e a Figura 4.32, observa-se que nos dois casos os valores da taxa de transporte de calor por evaporação são mais elevados que os das outras taxas de transporte de calor (por radiação, convecção e condução). Nota-se também que nos dois casos

o ponto de máximo da taxa de transporte de calor por evaporação ocorre por volta das 12:00 horas.

Nota-se também, que valores obtidos para a cidade de São Paulo foram aproximadamente metade dos obtidos para a cidade de João Pessoa. Esse fato era esperado uma vez que João Pessoa apresenta maiores temperaturas para o mês de julho e a proximidade da cidade com da linha do Equador garante uma menor inclinação dos raios solares durante o inverno, acarretando maiores valores de irradiância solar.

Essa proximidade com o Equador é benéfica do ponto de vista da evaporação, pois as taxas de irradiância não apresentam grandes variações durante o ano, e conseqüentemente as taxas de evaporação não serão tão afetadas pelas diferenças ocorridas nos meses de inverno como para cidades mais distantes do Equador (por exemplo, à cidade de São Paulo).

Como durante os meses de verão a taxa de irradiância em São Paulo é bem maior do que nos meses de inverno, fato este que não ocorre em João Pessoa, fez-se uma comparação dos resultados de Sartori (1996), no mês de julho, com resultados obtidos para a cidade de São Paulo no mês de dezembro, pois nestes meses os valores de irradiância solar são parecidos nas duas cidades. Segundo dados coletados no site do INPE (2006), o valor da média diária da irradiância solar para a cidade de João Pessoa no mês de julho de 1987 é de $0,1567\text{W/m}^2$ enquanto para a cidade de São Paulo é de $0,0092\text{W/m}^2$ no mês de julho e de $0,1022\text{W/m}^2$ no mês de dezembro do ano de 2005.

Os resultados experimentais deste trabalho, para a condição que obteve melhores taxas de evaporação no mês dezembro (inclinação de $3,25^\circ$ e vazão de $2,5\text{g/s}$), foram aplicados nas equações desenvolvidas por Sartori (1996), e obtiveram-se os resultados que podem ser visualizados na Figura 4.33.

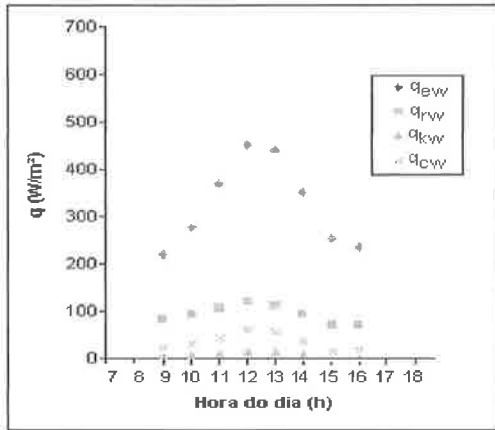


Figura 4.33. Transporte de calor x tempo, para o mês de dezembro.

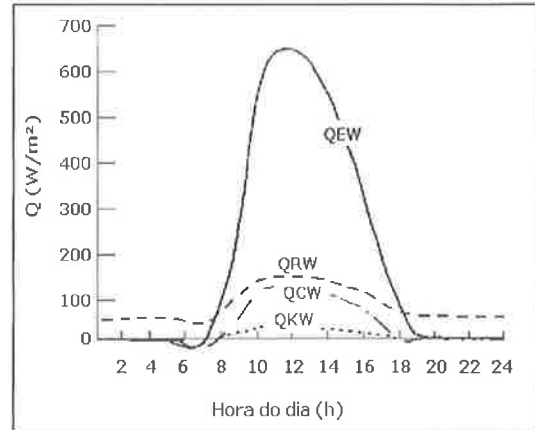


Figura 4.32. Transporte de calor x tempo, para o mês de julho, Sartori (1996).

Na Figura 4.35 observa-se que os resultados são mais elevados do que no caso anterior estando mais próximos aos resultados obtidos por Sartori (1996), mas ainda são inferiores, pois mesmo para o mês de dezembro os valores de irradiância solar ainda são inferiores.

Uma comparação interessante que pode ser realizada é dos resultados obtidos neste trabalho tanto para o mês de julho quanto para o mês de dezembro, ou seja, das Figuras 4.31 e Figura 4.33 respectivamente.

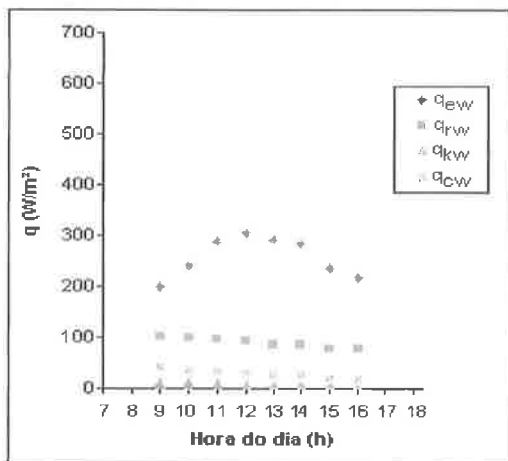


Figura 4.31. Transporte de calor x tempo, para o mês de julho.

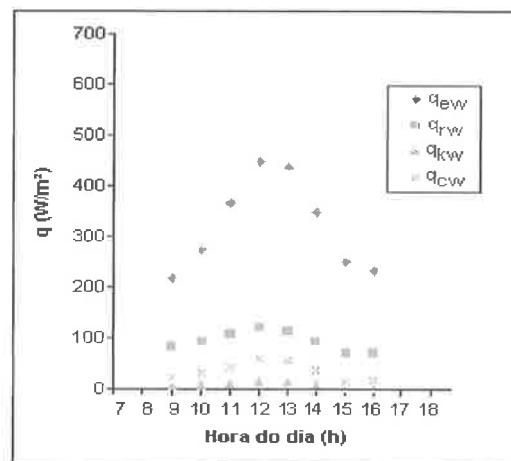


Figura 4.33. Transporte de calor x tempo, para o mês de dezembro.

Nota-se que para o mês de dezembro (Figura 4.33) os resultados da taxa de transporte de calor por evaporação são superiores aos do mês de julho (Figura 4.31), chegando a resultados até 41,9% maiores.

Como na cidade de João Pessoa os valores de incidência de irradiância solar não apresentam uma grande variação ao longo do ano, provavelmente a diferença nos valores da taxa de transporte de calor para os meses de inverno e de verão não será tão acentuada.

Na Figura 4.34 e na Figura 4.35 visualiza-se uma comparação dos dados de taxa de rendimento horária obtidos neste trabalho e obtidos por Sartori (1996), respectivamente. Para uma melhor visualização os gráficos foram colocados em uma mesma escala de valores.

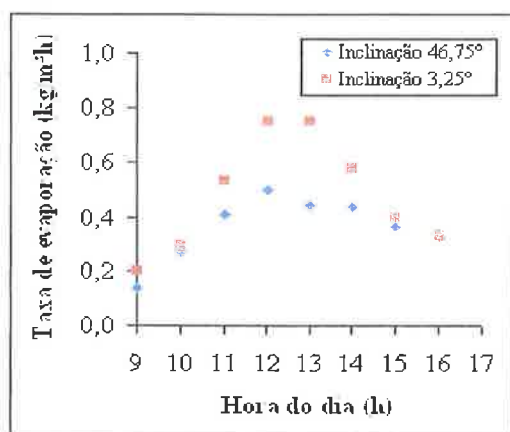


Figura 4.34 Evaporação x tempo

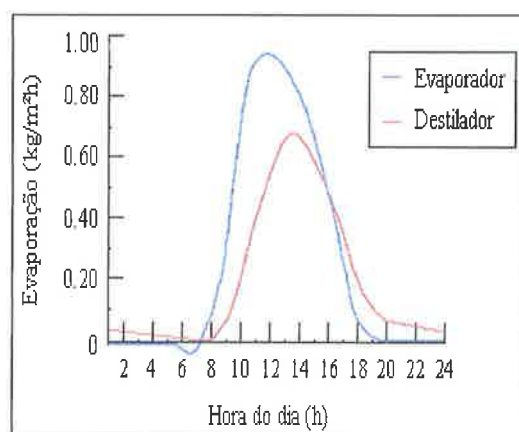


Figura 4.35 Evaporação x tempo (SARTORI, 1996)

A diferença de valores de taxa de evaporação obtidos neste trabalho e os valores apresentados no trabalho apresentado por Sartori, 1996 foi equivalente à diferença observada para a comparação de valores de transporte de calor por evaporação, pelos mesmos motivos expostos anteriormente (diferenças de temperaturas e valores de incidência de irradiância solar na cidade de São Paulo e na cidade de João Pessoa, tanto para o mês de julho quanto para o mês de dezembro).

4.5.2 Comparação de valores de transporte de calor e massa obtidos neste trabalho com valores obtidos por Srithar e Mani (2003)

Uma outra comparação muito interessante pode ser efetuada comparando os resultados de taxa de evaporação obtidos neste trabalho, visualizados na Figura 4.34, com os resultados obtidos por Srithar e Mani (2003), visualizados na Figura 4.36.

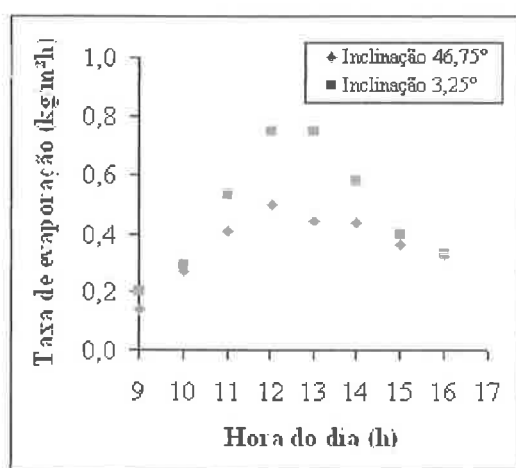


Figura 4.34 Evaporação x tempo

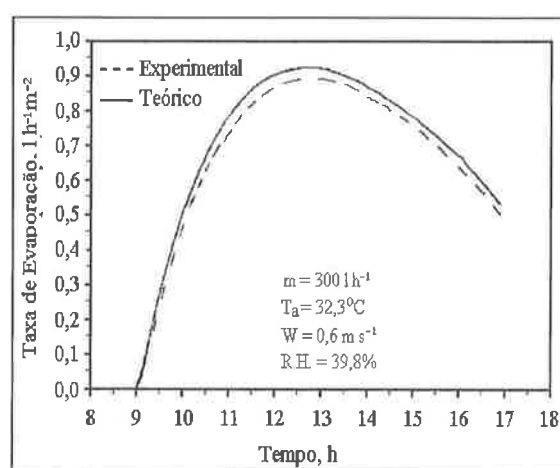


Figura 4.36 Evaporação x tempo (SRITHAR; MANI, 2003)

Nota-se que os comportamentos continuam os mesmos: com maiores valores de taxa de evaporação por volta das 12:00 horas e com este valor variando ao longo do dia. Vale a pena citar que os autores fizeram os experimentos em ambiente controlado (temperatura ambiente constante – T_a=32,3°C; velocidade do vento constante – W=0,6 m/s e umidade relativa fixa UR=39,8%) diferenciando de nossos experimentos que acontecem em ambiente aberto e sujeito a variações ambientais.

Srithar e Mani (2003), usam um trocador de calor para pré-aquecer a alimentação, atingindo temperaturas superiores de alimentação da placa plana. Esse sistema reutiliza o calor do

Srithar e Mani (2003), usam um trocador de calor para pré-aquecer a alimentação, atingindo temperaturas superiores de alimentação da placa plana. Esse sistema reutiliza o calor do concentrado e acarreta um ganho na taxa de evaporação. Esse fato pode ser utilizado para explicar a diferença apresentada nas taxas apresentadas nas figuras.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e recomendações com base na discussão dos resultados apresentada no Capítulo 4.

5.1 CONCLUSÕES

As principais conclusões foram:

- A energia solar é um substituto bastante atraente para os combustíveis fósseis e espera-se uma ampliação do uso de equipamentos solares, tanto para uso residencial, quanto para uso industrial;
- O Brasil é uma região propícia à implantação de equipamentos solares por apresentar valores elevados de radiação solar incidente, ao longo do ano, principalmente no norte e nordeste;
- A vazão de 2,5 g/s oferece a melhor condição para se obter maiores porcentagens de evaporação com filme estável e uniforme ao longo de todo o ano;
- O ajuste da inclinação da placa proporciona elevação de até 36,4% na porcentagem de evaporação, justificando a necessidade do ajuste mensal, com exceção do mês de setembro;

5.2 RECOMENDAÇÕES

Durante a elaboração desta tese surgiram algumas questões que necessitavam de muito tempo de dedicação ao estudo das mesmas. Portanto, elas estão sendo recomendadas para trabalhos futuros.

- Recomenda-se a construção desses pequenos concentradores solares investigando sua eficácia, como substituintes parciais dos combustíveis fósseis, na concentração de soluções diluídas em diversos procedimentos industriais;
- Resolver as equações de transporte de calor e massa usando as condições experimentais locais e a geometria do evaporador deste estudo;
- Verificar o desempenho do equipamento utilizando outros fluidos de processo.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR 10184/1988-a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Coletores solares planos para líquidos Determinação do rendimento térmico - Rio de Janeiro, 1988.

ADIR, M. L. **Como aproveitar a Energia Solar**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1985. 191p.

ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber, 2002. 155p.

ALVES, S. A geometria do globo terrestre. Disponível em: <<http://www.bienasbm.ufba.br/M29.pdf>>. Acesso em: 24 jul.2006.

AMBROSINI, W.; FORGIONE, N.; ORIOLO, F. Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, p. 1521-1540, 2002.

AMORIM, M. C. C.; PORTO, E. R.; SILVA JÚNIOR, L. G. A. Evaporação solar como alternativa de reuso dos efluentes da dessanilização por osmose inversa. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-007.pdf>>. Acesso em 17 jan. 2007.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Aplicações da energia solar em diversos setores. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)>. Acesso em: 16 jan. 2007.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITONING ENGINEERS. **ASHRAE: Systems and Equipment Handbook**. New York: ASHRAE, 1996.

ASTROSOL. Disponível em: <<http://www.astrosol.com.br>>. Acesso em: 08 mar. 2006.

BAHIA, G. Disponível em: <www.guilhermebahia.hpg.ig.com.br/pagina2.htm>. Acesso em: 09 jan.2004.

BAPTISTA, A. S. C. **Análise da viabilidade econômica da utilização de aquecedores solares de água em Resorts no nordeste do Brasil**. 2006. 158f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) - Coordenação de Programas de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BEZERRA, A. M. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. João Pessoa: Universitária, 1998. 243 p.

BIODIESELBR. O que é biodiesel? Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/biodiesel.htm>>. Acesso em 05 fev. 2007.

BOUCHEKIMA, B.; GROS B.; OUAHES R.; DIBOUN M. The performance of the capillary film solar still installed in South Algeria **Desalination**, v. 137, p. 31-38, 2001.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters, an introduction to design, data analysis and model building**. New York, John Wiley, 1978. 191p.

BUDIN, R.; MIHELÍĆ-BOGDANIĆ, A.; FILIPAN, V. Solarized Evaporation Process. **Energy Conversion & Management**. v.39, nº11, p. 1169-1175, 1998.

CÁCERES-VÁSQUEZ, J.; RODRÍGUEZ, S. M.; FERNANDÉZ-ALBA, A. R. Evaluación analítica y Optimización de Procesos de Oxidación Avanzada en Planta Piloto Solar. **Colección Documentos CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas)**, v.1, p. 1-336, 2003.

CARRADORI, L. **Distribuição de temperatura/pressão em evaporador de múltiplo efeito de filme descendente com promotor de película**. 2005. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

CEBI - Consultoria Empresarial Brasil-Itália2. **Maior usina solar do mundo será chinesa**. Disponível em: <<http://www.cebi2000.com.br/energia/noticias.asp?ener=S&idn=1840>>. Acesso em: 12 jan. 2007.

CEBI - Consultoria Empresarial Brasil-Itália2. **Produção mundial de energia solar se iguala a um terço de Itaipu**. Disponível em: <<http://www.cebi2000.com.br/energia/noticias.asp?ener=S&idn=1415>>. Acesso em: 22 nov. 2006.

CIEMAT - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Almeria, ES). **INFORME Anual 2001**, (Almeria), 2001. 88p.

COMETTA, E. **Energia Solar**. São Paulo: Editora Hemus, 1978. 127p.

CRUZ, A. **Magnitudes radiométricas y fotométricas**. Óptica Pura y Aplicada, p. 13, 1980.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. USA: John Wiley & Sons, 1980. 762 p.

DUNKLE, R. V. **Solar water distillation: the roof-type and a multiple effect diffusion still**. **International Heat Transfer Conference**, p. 895-902, 1961.

GARCIA, F.; PALMISANO, F. G. **Gerador solar de vapor**. 2005. 104f. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

GREENPEACE. O Protocolo de Kyoto. Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/clima/pdf/protocolo_kyoto.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2007.

HARTLEY, L. E.; MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; UTRILLAS, M. P.; TENA, F.; PEDRÓS, R. The optimization of the angle of inclination of a solar collector to maximize the incident solar radiation. **Renewable Energy**, v. 17, p. 291-309, 1999.

HAY, J. E; DAVIES, J. A. Calculation of the solar radiation Incident on inclined surface, proceedings first canadian solar radiation data Workshop, p. 59-72, 1980.

HONGFEI, Z. Experimental study on an enhanced falling film evaporation - air flow absorption and closed circulation solar still. **Energy**, v.26, p. 401- 412, 2001.

IAG; Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Disponível em: <www.iag.usp.br> Acesso em: 08 fev. 2005.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. D. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A., 1992. 455.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/sonda/>>. Acesso em: 08 mar. 2006.

INPI - INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Galeria de Inventores Brasileiros. Motor a álcool. Disponível em: <<http://inventabrasilnet.t5.com.br/indexn.htm>> Acesso em: 28 abr. 2006.

JOSÉ, C. L. V. **Influência da vazão de alimentação e da pressão na evaporação de solução de sacarose em um evaporador de película líquida descendente, com promotor de película**. 1998. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998.

KALOGIROU, S. A. Seawater desalination using renewable energy sources. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.31, p. 242-281, 2005.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.30, p. 231-295, 2004.

KALOGIROU, S. The potential of solar industrial process heat applications. **Applied Energy**, v.76, p. 337-361, 2003.

KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation in tilted surfaces. **Solar Energy**, v: 23:111, 1979.

KUNZE, H. A new approach to solar desalination for small-and medium-size use in remote areas. **Desalination**, v. 139, p. 35- 41, 2001.

LEU, J. S.; JANG, J. Y.; CHOU Y. Heat and mass transfer for liquid film evaporation along a vertical plate covered with a thin porous layer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 49: 1937-1945, 2006.

LIU, B. Y. H.; JORDAN R. C. The interrelationships and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation. - **Solar Energy**, v. 4, p. 1-12, 1960.

MACEDO, H. **Tratamento de águas com altas concentrações de cloretos**. 1996. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996.

MARTINI, A. D. **Montagem e avaliação de desempenho do evaporador de filme descendente com promotor de película em escala piloto**. 2004. 199f. Tese (Doutorado em

Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

MARTINI, A. D. **Influência da vazão e da temperatura de alimentação no processo de evaporação de água de coco (*Cocos nucifera* L) em um evaporador de filme descendente com promotor de película**. 2000. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Mapas de irradiação solar para o Brasil, Resultados do Projeto SWERA. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoramento Remoto** Goiânia: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p.3142.

MEZAACHE, E.; DAGUENET, M. Effects of inlet conditions on film evaporation along an inclined plate - **Solar Energy**, v. 78, p. 535-542, 2005.

MME - Ministério de Minas e Energia, Modelo Institucional do setor elétrico. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br> > Acesso em: 10 jan. 2007.

MOMOI A. **Projeto e testes de coletor solar de alta eficiência**. 2005. 94f. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

MONEGÓN, L. T. D. **Engineering Design Handbook for Stand Alone Photovoltaic Systems – Report nºM108**, 1980.

MORA BEJARANO, M. L. **Desenvolvimento de um evaporador de múltiplo efeito de filme descendente com promotor de película, em escala de bancada**. 2003. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

NOGUEIRA, K. R. B. **Estudo de processo de fotodegradação de efluentes aquosos contendo fenol em reator solar operando em batelada e batelada alimentada.** 2005. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, S. H. F. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase em eletrificação de residências de baixo consumo.** 1997, 240f. Dissertação (Mestrado em Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE/USP), Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração - FEA/Instituto de Eletrotécnica e Energia - IEE/Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 1997.

PALZ, W. **Energia Solar e fontes alternativas.** São Paulo: Hemus, 1981.358 p.

PETROBRÁS. Auto-suficiência em Petróleo destaca o Brasil no Cenário Internacional. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 30 abr. 2006 Disponível em: <<http://hotsites.folha.com.br/2006/04/30/petrobras>>. Acesso em: 16 mai. 2006.

PRADO, L. C. O sol como fonte de energia. **Revista Mensal de Cultura**, São Paulo, v. 1, p.1-34, 1980.

PROENÇA, C. N. O. **Tecnologias limpas para preservação e conservação da qualidade dos recursos hídricos no semi-árido do estado da Bahia.** 2002, 30f. Monografia - (Departamento de Hidráulica e Saneamento) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2002.

RIGHI, B. A. **Avaliação do desempenho de evaporador de filme descendente com promotor de película por meio de técnicas de projeto de experimentos.** 1999. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

ROSA, D. J. M. **Caracterização da radiação solar: O caso da cidade universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia**. 2003. 97f. Dissertação (Mestrado em Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo - PIPGE/USP), Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração - FEA/Instituto de Eletrotécnica e Energia - IEE/Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2003.

SALVAGNINI, W. M.; TAQUEDA, M. E. S. A Falling-Film Evaporator with Film Promoters. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, p. 6832-6835, 2004.

SARTORI, E. Solar still versus solar evaporator: a comparative study between their thermal behaviors. **Solar Energy**, v.56, nº2, p.199-206, 1996.

SILVA, A. V. R. **Nossa Estrela: O Sol Disponível em:** <www.cciencia.ufrj.br/cienciapoetas/astrologia/O%20Sol/Sol.ppt>. Acesso em: 09 jan.2004.

SOARES, M. T.; SILVA, I. J. O. C.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, nº 3, p. 730-737, 2006.

SONG, B.; INABA, H., HORIBE, A.; OZAKI, K. Heat, mass and momentum transfer of a water film flowing down a tilted plate exposed to solar irradiation. **Internacional Journal of Thermal Sciences**, v. 38, p.384-397, 1999.

SOUZA, T. R. **Análise das variáveis de processo e da deposição de sólidos em suspensão do suco de laranja em um evaporador de filme descendente com promotor de película**. 2003. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

SRITHAR, K.; MANI, A. Comparison Between Simulated and Experimental Performance of an Open Solar Flat Plate Collector For Treating Tannery Effluent. **International**

Communications in Heat and Mass Transfer, v. 30, nº 4, p. 505-514, 2003.

TIRIS, M.; TIRIS, C. Optimum Collector Slope and Model Evaluation: Case Study for Gebze, Turkey. **Energy Conversion & Management**, v. 39, nº 3/4, p. 167-172, 1998.

YAN, W.; SOONG, C. Convective heat and mass transfer along inclined heated plate with film evaporation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 38, nº 7, p. 1261-1269, 1994.

YOKOYAMA, E. O.; TANIKADO, R. K. **Coletor solar plano**. 2002. 93f. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2002.

ANEXOS

ANEXO I – OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES (2.62) E (2.64)

A equação 2.62 é obtida a partir da Lei de Newton, apresentada na equação (1).

$$q_c = h.L(t_a - t_\infty) \quad (1)$$

Em que: q_c é a taxa de transporte de calor por convecção (W/m^2); h é o coeficiente de transferência convectiva de calor ($W/m^2.K$); L é o comprimento da placa plana (m); t_a é a temperatura da água ($^{\circ}C$) e t_∞ é a temperatura atmosférica ($^{\circ}C$).

O coeficiente h pode ser calculado com a equação (2).

$$h = \frac{\bar{Nu}.k_g}{L} \quad (2)$$

Em que: \bar{Nu} é o número de Nusselt e k_g é a condutibilidade térmica da mistura gasosa (W/m^2K).

O cálculo de \bar{Nu} para fluxo laminar sobre a placa plana, pode ser obtido pela equação (3).

$$\bar{Nu} = 0,064.Re^{1/2}.Pr^{1/3} \quad (3)$$

Em que: Re é o número de Reynolds e Pr é o número de Prandtl.

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (4)$$

Em que: V é a velocidade do vento (m/s); L é o comprimento da placa plana (m) e ν é a viscosidade cinemática do ar (m^2/s).

Com o auxílio da tabela das propriedades termofísicas do ar na pressão atmosférica e temperatura de 298 K, obtém-se: $\nu = 15,89.10^{-6} m^2/s$; $k_g = 26,3.10^{-3} W/m.K$ e $Pr = 0,707$.

$$\text{Então: } Re = \frac{V.1,09}{15,89.10^{-6}} \rightarrow Re = 6,86.10^4.V \quad (\text{Escoamento laminar})$$

$$\bar{Nu} = 0,064.(6,86.10^4.V)^{1/2}.(0,707)^{1/3} = 14,93.V^{1/2} \quad \text{e} \quad h = \frac{14,93.V^{1/2}.26,3.10^{-3}}{1,09} = 0,36.V^{1/2}$$

Portanto:

$$q_c = 0,36.V^{1/2}.1,09.(t_a - t_\infty) \rightarrow \boxed{q_c = 0,392.V^{1/2}(t_a - t_\infty)} \quad \text{que é a equação (2.62).}$$

A equação 2.64 é obtida a partir da equação (5).

$$q_e = n'' \cdot h_w = \frac{\dot{m}}{A} \cdot h_w \quad (5)$$

Em que: q_e é a taxa de transporte de calor por evaporação (W/m^2); n'' é o fluxo de massa da água evaporada ($kg/s.m^2$); h_w é o calor latente de vaporização da água (kJ/kg); \dot{m} taxa de evaporação (kg/s) e A é a área do coletor solar (m^2).

O valor de n'' pode ser obtido com a equação (6).

$$n'' = \bar{h} \cdot (\rho_a - \rho_g) \quad (6)$$

Em que: \bar{h} é o coeficiente de transferência convectiva de massa (m/s); ρ_a é a massa específica do vapor da água (kg/m^3) e ρ_g é a massa específica da mistura gasosa (kg/m^3).

Como o ar atmosférico foi considerado gás ideal, têm-se:

$$q_e = \bar{h} \cdot \left(\frac{p_a M_a}{RT_a} - \frac{p_g M_g}{RT_g} \right) h_w \quad (7)$$

Em que: p_a é a pressão parcial de vapor de água, na temperatura da água (Pa); M_a é a massa molecular da água (g/mol); R é a constante universal dos gases ($R = 8,315 J/gmol.K$); T_a é a temperatura da água (K); p_g é a pressão da mistura gasosa, na temperatura T_g (Pa); M_g é a massa molecular da mistura gasosa saturada (g/mol) e T_g é a temperatura da mistura gasosa (K).

Na interface, considera-se: $T_a = T_g = T$ e como o equipamento é aberto para o ambiente $p_g = p_o$

$$\text{Então: } q_e = \frac{\bar{h}}{R \cdot T} \cdot (p_a M_a - p_o M_g) h_w \rightarrow q_e = \frac{\bar{h} \cdot M}{R \cdot T} \cdot (p_a - p_o) h_w \quad (8)$$

Em que: p_o é a pressão parcial de vapor de água, na temperatura de orvalho do ar (Pa).

Como o ar atmosférico pode ser considerado um gás ideal, têm-se:

$$q_e = \frac{\bar{h} \cdot \rho}{\rho_\infty} \cdot (p_a - p_o) h_w \quad (9)$$

O valor de ρ do vapor d'água saturado é obtido a partir de uma tabela. $\rightarrow \rho = 1,6187 \text{ kg/m}^3$.

O cálculo de \bar{h} pode ser obtido com a equação (9).

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu} \cdot \rho_{\text{ar, sat}}}{L} \quad (10)$$

Segundo Incropera e Witt (1992), o cálculo de \bar{Nu} para fluxo laminar na interface líquido gás, pode ser obtido pela equação (11).

$$\bar{Nu} = 0,332 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (11)$$

$$\text{Em que: } Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = 6,8 \cdot 10^4 V \rightarrow \text{Fluxo laminar.} \quad (12)$$

Neste caso, também se utiliza a tabela das propriedades termofísicas do ar na pressão atmosférica e temperatura de 298 K e obtém-se: $\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\rho_g = 0,026 \text{ kg/m}^3$ e $Pr = 0,707$.

$$\bar{Nu} = 0,332 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} = 0,332 \cdot (6,8 \cdot 10^4 \cdot V)^{1/2} \cdot (0,707)^{1/3} = 77,2 \cdot V^{1/2} \quad (13)$$

$$\text{Então: } \bar{h} = \frac{77,2 \cdot V^{1/2} \cdot 0,026}{1,09} = 1,84 \cdot V^{1/2} \quad (14)$$

Portanto:

$$q_e = \frac{1,84 \cdot V^{1/2} \cdot 1,6187}{\rho_\infty} \cdot (p_a - p_o) h_w \rightarrow \boxed{q_e = 2,6 \cdot V^{1/2} \cdot h_w \left(\frac{p_a - p_o}{\rho_\infty} \right)} \text{ que é a equação (2.63).}$$

ANEXO II - DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR (FORNECIDOS PELO I.A.G.)

ANOS: 1999, 2000, 2001, 2002, 2003 e 2004.

Data	Radiação Global (MJ/m ² .dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² .dia)				Média de Maio	12,671	4,544
01/01/1999	14,126	11,320	19/03/1999	21,145	4,986	01/06/1999	15,818	2,335
02/01/1999	9,770	9,408	20/03/1999	20,955	4,955	02/06/1999	15,019	2,958
03/01/1999	20,703	13,269	21/03/1999	10,887	7,728	03/06/1999	14,898	2,765
04/01/1999	16,632	13,482	22/03/1999	7,647	7,239	04/06/1999	6,520	5,915
05/01/1999	10,482	9,726	23/03/1999	15,504	11,997	05/06/1999	6,125	5,725
06/01/1999	4,361	4,357	24/03/1999	21,759	5,289	06/06/1999	2,563	2,493
07/01/1999	7,386	7,359	25/03/1999	18,272	8,389	07/06/1999	5,582	5,163
12/01/1999	12,984	11,002	26/03/1999	18,697	5,685	08/06/1999	6,304	5,356
13/01/1999	12,617	12,144	27/03/1999	20,961	5,226	09/06/1999	14,575	3,304
14/01/1999	16,066	11,337	28/03/1999	18,920	5,924	10/06/1999	8,793	4,987
15/01/1999	10,346	9,496	29/03/1999	18,322	4,446	16/06/1999	7,518	4,617
16/01/1999	15,429	14,247	30/03/1999	13,568	10,348	17/06/1999	13,233	3,064
17/01/1999	19,405	13,540	31/03/1999			18/06/1999	11,912	4,207
20/01/1999	27,343	6,425	Média de Março	18,014	7,393	19/06/1999	6,855	5,775
21/01/1999	17,128	7,347	06/04/1999	17,156	8,687	20/06/1999	1,407	1,363
24/01/1999	24,250	8,715	07/04/1999	18,924	6,381	21/06/1999	14,328	3,155
25/01/1999	21,599	9,150	08/04/1999	12,757	6,568	22/06/1999	9,133	5,663
26/01/1999	15,510	6,419	09/04/1999	8,558	8,229	23/06/1999	11,165	5,554
27/01/1999	14,402	12,741	10/04/1999	12,124	7,319	24/06/1999	13,490	2,679
28/01/1999	14,402	12,741	11/04/1999	20,285	4,509	25/06/1999	14,100	2,925
29/01/1999	19,361	10,414	12/04/1999	16,796	7,553	26/06/1999	11,452	6,110
30/01/1999	15,403	11,044	13/04/1999	9,192	6,458	27/06/1999	14,723	2,811
31/01/1999	12,613	10,097	14/04/1999	16,281	5,492	28/06/1999	14,670	2,175
Média de Janeiro	15,318	10,251	15/04/1999	10,896	7,758	29/06/1999	14,154	2,650
01/02/1999	9,636	7,755	16/04/1999	7,848	6,934	30/06/1999	11,837	5,426
02/02/1999	16,772	11,026	17/04/1999	13,106	3,746	Média de Junho	10,647	3,967
03/02/1999	16,799	13,564	18/04/1999	21,699	2,131	01/07/1999	14,020	4,346
04/02/1999	15,952	8,366	19/04/1999	19,737	3,245	02/07/1999	13,179	5,043
09/02/1999	8,486	8,190	20/04/1999	19,342	3,509	03/07/1999	13,871	4,610
10/02/1999	11,718	8,766	21/04/1999	14,970	8,391	04/07/1999	3,967	3,668
11/02/1999	23,386	8,501	22/04/1999	12,097	7,913	05/07/1999	1,511	1,481
12/02/1999	20,744	10,927	23/04/1999	16,339	7,149	06/07/1999	6,035	5,635
13/02/1999	19,988	7,677	24/04/1999	17,598	5,510	07/07/1999	3,362	3,135
14/02/1999	19,730	11,329	25/04/1999	18,708	4,970	08/07/1999	6,925	4,915
15/02/1999	14,943	14,018	26/04/1999	18,889	3,530	09/07/1999	11,795	4,962
16/02/1999	22,939	8,239	27/04/1999	12,783	7,640	10/07/1999	11,485	6,350
17/02/1999	19,766	13,060	28/04/1999	12,379	6,758	11/07/1999	9,388	5,325
18/02/1999	20,598	6,887	29/04/1999	16,674	4,080	12/07/1999	16,119	2,014
19/02/1999	14,085	10,136	Média de Abril	15,214	6,019	13/07/1999	15,544	2,441
20/02/1999	12,366	10,534	04/05/1999	16,931	4,003	14/07/1999	15,130	3,061
21/02/1999	18,585	11,927	05/05/1999	15,390	4,976	15/07/1999	15,478	1,777
22/02/1999	8,916	7,167	06/05/1999	5,591	4,908	16/07/1999	15,181	2,162
23/02/1999	21,139	11,311	07/05/1999	13,794	5,363	17/07/1999	14,067	2,919
24/02/1999	22,528	9,967	08/05/1999	16,211	6,605	18/07/1999	5,012	4,811
25/02/1999	15,408	8,483	09/05/1999	15,914	4,734	19/07/1999	14,117	3,966
Média de Fevereiro	16,880	9,897	10/05/1999	16,953	3,816	20/07/1999	15,879	2,020
02/03/1999	15,991	5,624	11/05/1999	11,793	7,953	21/07/1999	11,868	5,223
03/03/1999	22,906	7,443	12/05/1999	12,763	5,376	22/07/1999	9,824	6,227
04/03/1999	20,043	9,098	13/05/1999	5,639	5,218	23/07/1999	8,884	6,195
05/03/1999	19,201	8,902	14/05/1999	11,510	6,967	24/07/1999	12,559	5,069
06/03/1999	20,436	10,096	15/05/1999	11,051	6,556	25/07/1999	15,572	2,994
07/03/1999	19,130	7,756	16/05/1999	17,584	2,493	26/07/1999	15,858	2,521
08/03/1999	17,007	7,130	17/05/1999	17,065	2,322	27/07/1999	15,744	2,778
09/03/1999	21,906	6,166	18/05/1999	14,502	4,038	28/07/1999	3,518	3,405
10/03/1999	18,214	9,764	19/05/1999	14,908	3,691	29/07/1999	15,803	3,909
11/03/1999	8,987	8,099	20/05/1999	17,936	1,778	30/07/1999	14,933	4,173
12/03/1999	9,362	8,980	21/05/1999	8,099	3,595	31/07/1999	3,985	3,888
13/03/1999	20,791	7,306	22/05/1999	16,882	2,791	Média de Julho	11,310	3,904
14/03/1999	10,951	9,308	23/05/1999	14,479	3,604	01/08/1999	12,834	5,814
15/03/1999	21,554	7,608	24/05/1999	15,674	2,636	02/08/1999	12,532	4,495
16/03/1999	21,186	9,030	25/05/1999	8,636	5,276	03/08/1999	16,919	3,592
17/03/1999	19,652	7,870	26/05/1999	10,255	6,946	04/08/1999	17,527	3,269
18/03/1999	23,779	5,037	27/05/1999	7,716	6,016	05/08/1999	15,418	4,062
	22,683	4,365	28/05/1999	3,513	3,376	06/08/1999	17,288	2,597
			29/05/1999	12,854	4,773			
			30/05/1999	15,528	2,629			
			31/05/1999	5,606	4,800			

07/08/1999	6,099	5,870	12/10/1999	18,029	11,251	26/12/1999	20,713	10,806
08/08/1999	16,404	4,505	13/10/1999	21,002	6,977	27/12/1999	11,933	6,219
09/08/1999	17,749	3,100	14/10/1999	21,631	9,083	28/12/1999	22,929	9,863
10/08/1999	16,595	3,424	15/10/1999	20,036	11,120	29/12/1999	24,133	10,871
11/08/1999	15,758	3,672	16/10/1999	7,539	7,261	30/12/1999	25,327	8,185
12/08/1999	16,074	4,311	17/10/1999	3,427	3,349	31/12/1999	20,165	12,475
13/08/1999	2,750	2,644	18/10/1999	13,207	10,387	Média de		
14/08/1999	5,197	4,712	19/10/1999	6,274	6,140	Dezembro	20,260	8,999
15/08/1999	12,147	6,537	21/10/1999	10,935	9,441			
16/08/1999	15,016	5,113	22/10/1999	24,254	7,190			
17/08/1999	14,121	4,893	23/10/1999	24,714	9,980			
18/08/1999	18,011	4,388	24/10/1999	25,768	6,948			
19/08/1999	18,689	3,756	25/10/1999	11,343	10,326			
20/08/1999	19,503	2,939	26/10/1999	5,625	5,580			
21/08/1999	18,291	3,631	27/10/1999	13,055	11,251			
22/08/1999	18,315	5,239	28/10/1999	18,256	8,858			
23/08/1999	18,537	4,689	Média de					
24/08/1999	19,308	3,911	Outubro	15,084	8,323			
25/08/1999	18,478	4,263	04/11/1999	2,134	2,112			
26/08/1999	16,454	6,194	08/11/1999	8,727	2,975			
27/08/1999	18,041	4,947	09/11/1999	3,023	3,005			
28/08/1999	15,448	7,714	10/11/1999	4,807	4,801			
29/08/1999	17,282	7,018	11/11/1999	19,089	13,289			
30/08/1999	17,732	5,686	12/11/1999	6,602	6,582			
31/08/1999			13/11/1999	3,922	3,915			
Média de	15,543	4,512	14/11/1999	16,133	12,577			
			15/11/1999	15,736	13,478			
01/09/1999	19,304	4,307	16/11/1999	22,258	10,656			
02/09/1999	18,939	4,301	17/11/1999	28,910	6,861			
03/09/1999	18,288	5,062	18/11/1999	22,669	10,158			
04/09/1999	18,202	5,565	19/11/1999	20,931	13,998			
05/09/1999	18,163	6,738	20/11/1999	18,524	10,203			
06/09/1999	15,460	7,693	21/11/1999	16,623	13,608			
07/09/1999	17,405	7,229	22/11/1999	23,099	7,980			
08/09/1999	11,508	7,798	23/11/1999	25,253	7,661			
09/09/1999	7,653	6,754	24/11/1999	23,989	5,873			
10/09/1999	4,172	4,152	25/11/1999	28,523	6,051			
11/09/1999	5,121	5,107	26/11/1999	12,000	9,518			
12/09/1999	4,324	4,082	27/11/1999	23,104	9,477			
13/09/1999	19,003	7,936	28/11/1999	27,079	8,394			
14/09/1999	17,630	9,078	29/11/1999	27,273	9,528			
15/09/1999	3,500	3,489	30/11/1999	18,574	14,722			
16/09/1999	20,666	7,512	Média de					
17/09/1999	16,229	8,258	Novembro	17,458	8,643			
18/09/1999	21,904	6,507	01/12/1999	27,385	9,324			
19/09/1999	18,682	6,925	02/12/1999	26,434	8,124			
20/09/1999	15,617	10,506	03/12/1999	20,653	7,626			
21/09/1999	17,118	7,026	04/12/1999	17,328	10,936			
22/09/1999	15,555	10,095	05/12/1999	27,116	6,246			
23/09/1999	14,341	9,207	06/12/1999	16,192	11,347			
24/09/1999	18,531	8,379	07/12/1999	16,735	12,172			
25/09/1999	23,490	4,568	08/12/1999	15,310	8,833			
26/09/1999	25,531	3,487	09/12/1999	12,965	12,546			
27/09/1999	23,489	4,825	10/12/1999	11,014	10,589			
28/09/1999	22,931	5,337	11/12/1999	9,734	9,344			
29/09/1999	17,886	9,656	12/12/1999	10,440	9,934			
Média de	16,229	6,606	13/12/1999	6,717	6,711			
			14/12/1999	13,493	10,927			
01/10/1999	22,786	6,839	15/12/1999	24,311	10,116			
02/10/1999	7,019	6,622	16/12/1999	30,505	6,170			
03/10/1999	5,668	5,613	17/12/1999	28,708	5,763			
04/10/1999	3,439	3,412	18/12/1999	30,180	5,051			
05/10/1999	12,537	11,241	19/12/1999	23,848	7,253			
06/10/1999	19,157	8,750	20/12/1999	29,395	4,724			
07/10/1999	21,734	8,529	21/12/1999	28,484	6,418			
08/10/1999	14,171	10,772	22/12/1999	24,276	8,769			
09/10/1999	24,851	5,033	23/12/1999	13,709	10,059			
10/10/1999	18,825	11,258	24/12/1999	16,491	11,290			
11/10/1999	11,977	11,507	25/12/1999	21,421	10,263			

Data	Radiação Global (MJ/m ² /dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² /dia)
01/01/00	9,361	8,700
02/01/00	5,264	5,263
03/01/00	10,218	9,672
04/01/00	7,865	7,835
05/01/00	7,024	7,014
06/01/00	14,689	13,279
07/01/00	14,143	5,517
08/01/00	21,066	8,101
09/01/00	21,660	8,952
13/01/00	16,405	6,062
14/01/00	18,248	5,598
15/01/00	22,310	12,415
16/01/00	20,992	11,053
17/01/00	22,929	6,759
18/01/00	20,686	8,907
19/01/00	9,638	9,115
20/01/00	25,803	13,275
21/01/00	23,623	12,373
22/01/00	28,271	7,504
23/01/00	30,567	4,477
24/01/00	21,086	13,503
25/01/00	21,518	10,641
26/01/00	3,942	3,926
27/01/00	17,253	11,312
28/01/00	26,476	9,422
29/01/00	18,255	12,276
30/01/00	19,472	11,814
31/01/00	15,683	12,734
Média de Janeiro	17,659	9,196
01/02/00	13,571	9,497
02/02/00	21,258	9,368
08/02/00	11,332	10,796
09/02/00	15,191	10,496
10/02/00	9,317	9,239
11/02/00	9,061	8,977
12/02/00	8,167	7,738
13/02/00	5,340	5,289
14/02/00	21,450	12,834
15/02/00	18,781	10,124
16/02/00	10,227	10,076
17/02/00	7,636	7,519
18/02/00	16,802	13,695
19/02/00	21,107	13,533
20/02/00	21,144	10,912
21/02/00	20,276	7,065
22/02/00	24,340	7,045
23/02/00	18,265	6,315
24/02/00	20,935	5,089
25/02/00	23,367	7,380
26/02/00	22,588	7,923
27/02/00	21,384	7,156
28/02/00	18,103	5,156
29/02/00	18,461	5,129
Média de Fevereiro	16,588	8,681
01/03/00	16,586	6,506
02/03/00	23,546	6,371
03/03/00	15,148	5,940
04/03/00	22,001	5,283
05/03/00	24,292	5,868
06/03/00	23,623	6,058
07/03/00	6,132	5,907
08/03/00	14,325	11,877
09/03/00	21,325	8,087

10/03/00	15,841	10,436
11/03/00	8,541	8,228
12/03/00	14,763	10,812
13/03/00	22,706	6,105
14/03/00	20,054	9,377
15/03/00	13,000	10,659
16/03/00	11,222	7,362
17/03/00	15,537	9,588
18/03/00	9,833	7,283
19/03/00	11,003	9,034
20/03/00	6,275	6,213
21/03/00	12,410	9,915
22/03/00	8,504	7,986
23/03/00	12,077	10,735
24/03/00	19,255	6,895
25/03/00	13,979	8,696
26/03/00	14,673	10,177
27/03/00	12,701	9,410
28/03/00	9,025	8,202
29/03/00	4,048	3,953
30/03/00	11,213	8,693
31/03/00	17,320	5,039
Média de Março	14,547	7,958
01/04/00	17,970	8,004
02/04/00	8,828	7,814
03/04/00	9,551	8,855
04/04/00	21,469	5,051
05/04/00	19,129	5,250
06/04/00	17,859	6,594
07/04/00	18,997	3,850
08/04/00	18,948	5,036
09/04/00	19,056	5,265
10/04/00	16,439	4,434
11/04/00	19,536	4,656
15/04/00	17,958	6,714
16/04/00	20,396	4,397
17/04/00	16,332	7,811
18/04/00	11,583	8,714
25/04/00	19,170	2,424
26/04/00	17,287	3,896
27/04/00	17,787	3,011
28/04/00	18,003	2,742
29/04/00	17,536	4,404
30/04/00	18,646	3,024
Média de Abril	17,261	5,331
01/05/00	14,776	4,894
02/05/00	16,504	3,191
03/05/00	10,815	3,060
04/05/00	15,402	4,347
05/05/00	17,467	3,004
06/05/00	10,133	4,543
07/05/00	12,396	7,052
08/05/00	11,257	6,610
09/05/00	13,305	6,710
10/05/00	12,519	4,360
11/05/00	13,096	6,636
12/05/00	13,210	5,737
13/05/00	16,781	3,094
14/05/00	15,376	4,364
15/05/00	14,562	4,899
16/05/00	12,400	4,925
17/05/00	8,472	5,360
18/05/00	15,111	3,293
19/05/00	10,553	5,507
20/05/00	8,299	5,666
21/05/00	11,366	6,322

22/05/00	16,033	2,748
23/05/00	12,677	4,728
24/05/00	14,663	4,606
25/05/00	15,350	2,922
26/05/00	14,111	3,044
27/05/00	4,497	4,116
28/05/00	16,851	1,608
29/05/00	16,107	1,672
30/05/00	13,423	3,930
31/05/00	15,058	2,276
Média de Maio	13,309	4,362
01/06/00	2,368	2,255
02/06/00	12,259	5,372
03/06/00	12,501	6,247
04/06/00	13,491	6,027
05/06/00	12,730	4,282
06/06/00	13,505	2,688
07/06/00	14,721	1,804
08/06/00	15,199	1,896
09/06/00	10,897	3,726
10/06/00	10,268	5,845
11/06/00	11,487	5,649
12/06/00	8,387	3,911
13/06/00	11,767	4,640
14/06/00	13,089	2,758
15/06/00	12,558	2,666
16/06/00	13,404	2,857
17/06/00	12,161	3,127
18/06/00	11,087	5,925
19/06/00	8,761	5,672
20/06/00	7,966	5,346
21/06/00	8,715	4,290
22/06/00	14,774	2,716
23/06/00	14,770	2,252
24/06/00	15,886	1,731
25/06/00	13,423	3,464
26/06/00	8,664	3,845
27/06/00	9,616	4,580
28/06/00	13,995	1,923
29/06/00	11,513	6,271
30/06/00	6,967	5,246
Média de Junho	11,564	3,967
01/07/00	15,088	2,357
02/07/00	15,471	2,122
03/07/00	3,709	3,413
04/07/00	3,740	3,452
05/07/00	10,669	4,364
06/07/00	15,589	1,791
07/07/00	14,457	2,868
08/07/00	13,858	2,702
09/07/00	15,114	2,320
10/07/00	15,482	2,678
11/07/00	7,412	6,050
12/07/00	5,352	4,539
13/07/00	9,368	5,545
14/07/00	4,712	4,531
15/07/00	7,098	4,063
16/07/00	16,228	2,520
17/07/00	16,790	1,554
18/07/00	13,004	6,623
19/07/00	5,404	4,460
20/07/00	15,593	3,100
21/07/00	15,919	2,721
22/07/00	6,894	5,801
23/07/00	2,767	2,701
24/07/00	12,625	6,222

25/07/00	13,738	5,606
26/07/00	5,952	5,694
27/07/00	9,524	7,696
28/07/00	16,900	3,066
29/07/00	16,340	3,473
30/07/00	16,528	3,285
31/07/00	15,094	3,946
Média de Julho	11,497	3,912
01/08/00	12,180	6,148
02/08/00	12,440	6,021
08/08/00	14,265	2,964
09/08/00	16,129	2,817
10/08/00	3,610	3,448
11/08/00	4,964	4,751
12/08/00	8,390	6,517
13/08/00	19,056	2,641
14/08/00	17,350	3,931
15/08/00	16,346	4,004
16/08/00	2,705	2,638
17/08/00	9,752	5,988
18/08/00	11,755	6,321
19/08/00	17,957	6,327
20/08/00	17,968	4,453
21/08/00	19,259	2,600
22/08/00	18,555	2,969
23/08/00	16,905	5,718
24/08/00	17,993	3,473
25/08/00	19,062	3,019
26/08/00	17,338	5,610
27/08/00	9,219	7,785
28/08/00	1,933	1,915
29/08/00	9,104	7,397
30/08/00	16,710	4,978
31/08/00	4,157	3,905
Média de Agosto	12,888	4,551
01/09/00	7,149	5,125
02/09/00	2,405	2,384
03/09/00	3,164	3,125
04/09/00	6,593	6,380
05/09/00	16,075	7,407
06/09/00	6,944	6,126
07/09/00	15,146	8,109
08/09/00	16,463	7,396
09/09/00	15,975	8,354
10/09/00	21,951	4,308
11/09/00	21,685	4,959
12/09/00	5,545	5,282
13/09/00	11,712	8,690
14/09/00	17,099	10,670
15/09/00	14,275	8,170
16/09/00	4,547	4,475
17/09/00	5,308	5,190
18/09/00	17,272	6,369
19/09/00	13,476	1,319
20/09/00	21,361	4,871
21/09/00	22,498	4,671
22/09/00	8,292	7,669
23/09/00	18,796	6,335
24/09/00	21,169	5,730
25/09/00	4,294	4,252
26/09/00	5,830	5,796
27/09/00	18,305	8,514
28/09/00	22,708	6,262
29/09/00	22,598	4,766
30/09/00	23,158	7,201
Média de Setembro	13,726	5,997

01/10/00	24,193	6,204
02/10/00	24,189	4,943
03/10/00	22,635	5,474
04/10/00	16,419	9,032
05/10/00	13,468	9,027
06/10/00	10,889	8,415
07/10/00	25,013	4,996
08/10/00	22,366	8,385
09/10/00	18,039	9,384
10/10/00	14,568	10,612
11/10/00	17,973	10,138
12/10/00	19,199	8,716
13/10/00	21,237	6,571
14/10/00	16,494	10,101
15/10/00	19,548	11,339
16/10/00	21,906	8,227
17/10/00	23,340	7,250
18/10/00	25,089	5,312
19/10/00	22,319	7,845
20/10/00	21,893	6,514
21/10/00	14,989	11,993
22/10/00	26,913	6,252
23/10/00	26,336	5,097
24/10/00	20,749	10,521
25/10/00	9,121	8,630
26/10/00	20,361	9,091
27/10/00	14,538	11,262
28/10/00	7,094	6,949
29/10/00	10,951	10,341
30/10/00	24,977	6,602
31/10/00	19,170	10,646
Média de Outubro	19,225	8,254
01/11/00	20,255	7,172
02/11/00	25,345	8,129
03/11/00	12,424	10,705
04/11/00	18,372	11,104
05/11/00	16,908	12,666
06/11/00	20,506	13,097
07/11/00	9,169	9,091
08/11/00	28,370	6,435
09/11/00	25,498	7,824
10/11/00	12,990	9,412
11/11/00	24,580	10,098
12/11/00	19,292	13,741
13/11/00	18,756	12,997
14/11/00	5,062	5,060
15/11/00	17,273	11,222
16/11/00	20,291	13,960
17/11/00	18,730	12,522
18/11/00	4,345	4,334
19/11/00	17,003	12,887
20/11/00	24,692	7,488
21/11/00	18,427	8,561
22/11/00	22,031	9,125
23/11/00	26,814	10,997
24/11/00	22,218	7,430
25/11/00	10,564	10,376
26/11/00	10,106	9,836
27/11/00	16,894	9,688
28/11/00	23,796	8,092
29/11/00	24,563	9,528
30/11/00	14,172	11,458
Média de Novembro	18,315	9,835
01/12/00	8,796	8,513
02/12/00	17,192	13,117
03/12/00	23,802	6,607
04/12/00	8,672	8,153

06/12/00	20,718	11,403
07/12/00	29,531	4,619
08/12/00	25,002	8,547
09/12/00	26,263	7,693
10/12/00	14,959	9,675
11/12/00	25,684	11,604
12/12/00	20,985	7,439
13/12/00	15,578	9,494
14/12/00	15,325	12,339
15/12/00	15,256	13,199
16/12/00	10,249	9,360
17/12/00	5,951	5,720
18/12/00	10,069	10,067
19/12/00	18,826	11,756
20/12/00	24,371	8,241
21/12/00	22,857	7,581
22/12/00	23,218	7,761
23/12/00	24,059	7,820
24/12/00	20,479	9,291
25/12/00	18,950	14,855
26/12/00	12,209	10,199
27/12/00	25,320	10,440
28/12/00	16,343	11,328
29/12/00	18,912	13,190
30/12/00	14,719	10,456
31/12/00	7,763	7,761
Média de Dezembro	18,069	9,608

Data	Radiação Global (MJ/m ² .dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² .dia)
1/1/2001	19,868	12,612
2/1/2001	26,084	10,533
3/1/2001	18,383	11,360
4/1/2001	22,857	8,952
5/1/2001	24,405	5,841
6/1/2001	23,816	9,275
7/1/2001	18,984	9,020
8/1/2001	21,855	12,326
9/1/2001	26,022	7,880
10/1/2001	21,792	10,113
11/1/2001	24,191	8,048
12/1/2001	17,926	13,193
13/1/2001	14,897	11,289
14/1/2001	19,150	11,921
15/1/2001	16,128	6,057
24/1/2001	10,406	7,683
25/1/2001	17,228	14,145
26/1/2001	20,278	13,160
27/1/2001	23,794	8,910
28/1/2001	27,363	5,591
29/1/2001	26,557	6,152
30/1/2001	15,400	9,770
31/1/2001	10,526	6,963
Média de Janeiro	20,344	9,600
1/2/2001	22,342	11,141
2/2/2001	23,646	7,480
3/2/2001	19,528	10,594
4/2/2001	20,583	6,258
5/2/2001	18,783	6,349
6/2/2001	18,005	11,190
7/2/2001	9,780	8,362
8/2/2001	20,596	11,001
9/2/2001	7,548	7,528
10/2/2001	12,490	9,869
11/2/2001	21,958	12,526
12/2/2001	21,104	9,662
13/2/2001	12,131	11,399
14/2/2001	15,216	12,550
15/2/2001	17,380	11,261
16/2/2001	16,773	8,069
17/2/2001	14,641	12,738
18/2/2001	17,202	7,254
19/2/2001	21,394	7,051
20/2/2001	16,541	11,721
21/2/2001	18,780	6,678
22/2/2001	17,689	10,213
23/2/2001	12,712	7,120
24/2/2001	20,220	6,585
25/2/2001	19,378	6,560
26/2/2001	22,131	7,717
27/2/2001	20,145	11,698
28/2/2001	21,495	7,827
Média de Fevereiro	17,864	9,229
1/3/2001	23,686	6,822
2/3/2001	18,603	4,363
3/3/2001	20,706	5,572
4/3/2001	24,873	6,098
5/3/2001	19,919	7,495
6/3/2001	22,570	8,671
7/3/2001	16,042	9,283
8/3/2001	6,719	6,689
9/3/2001	12,243	11,033
10/3/2001	10,858	8,444
11/3/2001	21,524	7,774
12/3/2001	16,939	9,052
13/3/2001	20,731	5,426
14/3/2001	16,684	5,084
15/3/2001	16,120	5,094
16/3/2001	20,281	6,357
17/3/2001	13,550	4,875
18/3/2001	15,084	9,950
19/3/2001	11,838	9,803
20/3/2001	13,385	5,293
21/3/2001	19,956	6,514
22/3/2001	19,846	4,968
23/3/2001	17,728	5,263
24/3/2001	12,615	4,394
25/3/2001	16,566	5,202
26/3/2001	19,961	6,192
27/3/2001	18,638	6,494
28/3/2001	12,624	5,929
29/3/2001	10,027	7,763
30/3/2001	16,800	9,454
31/3/2001	19,815	5,910
Média de Março	16,998	6,815
1/4/2001	19,208	4,920
2/4/2001	8,101	7,691
3/4/2001	14,556	7,866
4/4/2001	20,640	4,928
5/4/2001	17,298	7,054
6/4/2001	18,534	4,646
7/4/2001	17,399	8,092
8/4/2001	16,186	9,102
9/4/2001	16,071	7,736
10/4/2001	12,324	7,546
12/4/2001	18,725	5,211
13/4/2001	20,578	3,956
14/4/2001	20,797	2,733
15/4/2001	19,855	3,206
16/4/2001	20,799	2,295
17/4/2001	18,652	4,320
18/4/2001	19,370	3,427
19/4/2001	17,330	4,883
20/4/2001	19,686	2,927
21/4/2001	17,075	5,408
22/4/2001	11,377	7,878
Média de Abril	17,360	5,515
23/5/2001	8,906	6,154
24/5/2001	9,083	6,662
25/5/2001	11,186	5,478
26/5/2001	9,623	6,432
27/5/2001	2,852	2,614
28/5/2001	10,497	5,255
29/5/2001	13,170	4,364
30/5/2001	15,087	2,299
31/5/2001	13,994	3,495
Média de Maio	10,489	4,750
1/6/2001	13,956	3,278
2/6/2001	12,754	2,868
3/6/2001	14,559	2,675
4/6/2001	11,910	3,471
5/6/2001	14,481	2,221
6/6/2001	15,133	1,750
7/6/2001	6,145	5,068
8/6/2001	4,914	4,690
9/6/2001	12,600	5,733
10/6/2001	10,737	6,093
11/6/2001	8,719	5,994
12/6/2001	11,791	3,443
13/6/2001	13,692	2,925
14/6/2001	13,886	2,592
15/6/2001	14,257	2,662
16/6/2001	12,675	3,291
17/6/2001	10,638	5,819
18/6/2001	1,402	1,295
19/6/2001	4,014	3,755
20/6/2001	2,896	2,687
21/6/2001	12,771	2,589
22/6/2001	10,310	5,899
23/6/2001	12,967	4,173
24/6/2001	7,858	5,946
25/6/2001	13,723	3,819
26/6/2001	4,691	2,960
27/6/2001	15,426	1,800
28/6/2001	5,589	5,035
29/6/2001	10,903	5,551
30/6/2001	13,710	3,045
Média de Junho	10,637	3,771
1/7/2001	13,055	3,502
2/7/2001	13,524	2,529
3/7/2001	12,820	3,311
4/7/2001	13,824	2,233
5/7/2001	14,382	2,536
7/7/2001	14,203	3,121
8/7/2001	14,019	3,681
9/7/2001	12,952	3,716
10/7/2001	14,147	2,333
11/7/2001	14,911	2,482
12/7/2001	2,562	2,479
13/7/2001	6,053	5,778
14/7/2001	14,413	2,758
15/7/2001	14,544	3,762
16/7/2001	16,546	3,438
17/7/2001	15,071	2,305
18/7/2001	15,620	2,095
19/7/2001	12,244	5,058
20/7/2001	14,800	3,343
21/7/2001	14,127	3,370
22/7/2001	4,438	4,230
23/7/2001	2,845	2,764
24/7/2001	4,257	4,130
25/7/2001	10,814	5,776
26/7/2001	5,666	3,838
27/7/2001	5,149	4,198
28/7/2001	3,102	3,042
29/7/2001	15,589	3,487
30/7/2001	15,608	2,878
31/7/2001	16,041	2,482
Média de Julho	11,578	3,355
1/8/2001	14,687	2,945
2/8/2001	16,085	2,218
3/8/2001	15,964	2,545
4/8/2001	16,877	2,801
5/8/2001	14,352	5,211
6/8/2001	16,324	3,428
7/8/2001	15,588	3,483
8/8/2001	11,452	6,773
9/8/2001	15,231	4,933
10/8/2001	15,058	5,394
11/8/2001	13,838	6,445
12/8/2001	16,381	4,339
13/8/2001	17,671	3,101
14/8/2001	16,436	5,024
15/8/2001	18,102	2,904
16/8/2001	17,836	4,012
17/8/2001	17,181	3,449
18/8/2001	18,956	2,923

19/8/2001	17,853	3,312
20/8/2001	15,368	5,727
21/8/2001	12,478	7,487
22/8/2001	7,376	6,009
23/8/2001	9,133	6,724
24/8/2001	12,341	5,185
25/8/2001	18,903	3,587
26/8/2001	12,001	7,502
27/8/2001	11,467	6,036
28/8/2001	12,994	6,088
29/8/2001	5,212	4,822
30/8/2001	19,706	4,290
31/8/2001	17,471	4,524
Média de Agosto	14,849	4,620
1/9/2001	18,109	5,112
2/9/2001	19,805	4,109
3/9/2001	19,949	4,102
4/9/2001	18,672	4,472
5/9/2001	16,902	8,106
6/9/2001	8,620	7,815
7/9/2001	14,564	9,400
8/9/2001	20,770	4,319
9/9/2001	21,064	3,751
10/9/2001	17,622	6,195
11/9/2001	5,718	5,042
12/9/2001	20,329	7,633
13/9/2001	19,742	5,683
14/9/2001	2,547	2,540
15/9/2001	10,753	7,866
16/9/2001	15,156	7,457
17/9/2001	12,731	9,181
18/9/2001	13,423	8,911
19/9/2001	23,019	3,407
20/9/2001	19,526	5,662
27/9/2001	4,573	4,561
28/9/2001	12,695	9,384
29/9/2001	12,630	7,590
30/9/2001	18,176	7,442
Média de Setembro	15,296	6,239
1/10/2001	2,635	2,607
2/10/2001	13,478	9,468
3/10/2001	23,900	4,966
4/10/2001	25,415	3,411
5/10/2001	23,147	4,719
6/10/2001	21,595	5,808
7/10/2001	22,507	8,537
8/10/2001	5,277	5,269
9/10/2001	7,925	7,872
10/10/2001	20,308	8,644
11/10/2001	13,476	11,102
12/10/2001	20,246	7,824
13/10/2001	23,367	8,866
14/10/2001	21,976	10,412
15/10/2001	24,148	6,505
16/10/2001	22,273	9,734
17/10/2001	17,300	12,552
18/10/2001	19,042	8,660
19/10/2001	14,420	9,735
20/10/2001	15,315	11,286
21/10/2001	24,312	7,156
22/10/2001	14,782	9,016
23/10/2001	25,936	5,497
24/10/2001	25,687	7,119
25/10/2001	26,778	4,840
26/10/2001	27,059	4,985
27/10/2001	27,103	5,192
28/10/2001	26,954	4,880

Média de Outubro	20,344	7,236
1/11/2001	22,174	7,555
2/11/2001	13,125	12,517
3/11/2001	5,315	5,304
4/11/2001	6,091	6,056
5/11/2001	19,861	10,365
6/11/2001	25,721	6,350
7/11/2001	24,776	6,880
8/11/2001	25,013	7,354
9/11/2001	22,282	11,563
10/11/2001	18,046	9,308
11/11/2001	6,377	6,117
12/11/2001	8,585	8,524
13/11/2001	15,739	13,396
14/11/2001	14,462	10,223
15/11/2001	10,725	10,363
16/11/2001	10,542	10,059
17/11/2001	10,416	9,361
18/11/2001	16,727	13,786
19/11/2001	17,612	8,726
20/11/2001	22,541	12,795
21/11/2001	19,810	7,211
22/11/2001	23,552	7,506
23/11/2001	23,370	9,307
24/11/2001	26,416	6,789
25/11/2001	25,057	9,112
26/11/2001	28,462	5,619
27/11/2001	24,373	8,546
28/11/2001	15,558	10,293
29/11/2001	23,791	8,395
30/11/2001	14,542	13,131
Média de Novembro	18,035	9,084
1/12/2001	27,525	6,803
2/12/2001	29,086	5,151
3/12/2001	29,253	5,534
4/12/2001	21,681	12,847
5/12/2001	22,243	12,169
6/12/2001	13,764	12,689
7/12/2001	20,389	11,239
8/12/2001	22,354	9,078
9/12/2001	9,073	7,707
10/12/2001	12,298	11,431
11/12/2001	13,079	11,050
12/12/2001	17,949	14,551
13/12/2001	6,244	6,227
14/12/2001	8,112	8,112
15/12/2001	5,966	5,966
16/12/2001	10,946	9,799
17/12/2001	24,983	9,386
18/12/2001	27,957	6,585
19/12/2001	24,709	8,614
20/12/2001	18,389	7,459
21/12/2001	20,000	8,181
22/12/2001	17,924	11,367
23/12/2001	8,277	8,270
24/12/2001	11,815	11,681
25/12/2001	17,616	13,792
Média de Dezembro	17,665	9,428

Data	Radiação Global (MJ/m ² dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² dia)
3/1/2002	22,044	7,160
4/1/2002	22,790	12,251
5/1/2002	25,218	9,982
6/1/2002	24,087	8,388
8/1/2002	11,561	7,247
9/1/2002	10,605	9,583
10/1/2002	14,382	14,025
11/1/2002	13,916	12,115
12/1/2002	9,594	9,592
13/1/2002	6,001	5,998
14/1/2002	17,461	10,967
15/1/2002	10,697	10,237
16/1/2002	11,885	11,286
17/1/2002	21,984	12,511
18/1/2002	15,522	15,022
19/1/2002	10,401	7,732
20/1/2002	18,202	14,602
21/1/2002	25,461	8,407
22/1/2002	24,808	8,064
23/1/2002	16,500	13,053
24/1/2002	19,018	9,780
25/1/2002	207,221	17,367
26/1/2002	27,784	4,858
27/1/2002	27,676	5,379
28/1/2002	23,390	8,793
29/1/2002	23,182	9,699
30/1/2002	13,341	11,651
31/1/2002	20,180	7,144
Média de Janeiro	24,818	10,103
1/2/2002	9,936	7,306
2/2/2002	12,293	9,881
3/2/2002	17,159	11,665
4/2/2002	25,620	7,480
5/2/2002	25,108	7,477
6/2/2002	16,559	9,177
7/2/2002	10,005	8,155
8/2/2002	16,404	12,478
9/2/2002	4,416	4,408
10/2/2002	22,689	10,849
11/2/2002	25,933	6,468
12/2/2002	18,728	6,184
13/2/2002	16,702	12,052
14/2/2002	12,782	11,150
15/2/2002	24,018	8,023
16/2/2002	19,852	12,189
17/2/2002	16,851	12,627
18/2/2002	20,336	12,426
19/2/2002	21,439	10,949
20/2/2002	6,827	6,805
21/2/2002	9,459	9,408
22/2/2002	11,983	9,517
23/2/2002	16,889	10,740
24/2/2002	24,740	7,460
25/2/2002	18,120	11,621
26/2/2002	17,145	12,254
27/2/2002	6,483	6,437
28/2/2002	6,878	6,188
Média de Fevereiro	16,263	9,335
1/3/2002	24,639	7,860
2/3/2002	12,392	6,573
3/3/2002	17,901	10,337
4/3/2002	17,460	4,643
5/3/2002	24,161	4,258

6/3/2002	24,120	5,039
7/3/2002	22,089	5,152
8/3/2002	20,661	4,305
9/3/2002	21,528	5,403
10/3/2002	23,419	4,649
11/3/2002	22,224	4,647
12/3/2002	20,103	6,008
13/3/2002	19,767	6,609
14/3/2002	8,789	8,040
15/3/2002	21,133	4,360
16/3/2002	16,226	5,629
17/3/2002	20,472	5,977
18/3/2002	18,382	5,700
19/3/2002	20,610	4,950
20/3/2002	20,441	6,235
21/3/2002	10,848	9,603
22/3/2002	13,993	8,987
23/3/2002	17,566	6,559
24/3/2002	4,519	4,354
25/3/2002	15,397	8,840
26/3/2002	20,024	7,509
27/3/2002	17,321	6,137
28/3/2002	15,594	8,178
29/3/2002	21,301	4,078
30/3/2002	23,074	2,394
31/3/2002	22,024	3,087
Média de Março	18,651	6,003
1/4/2002	21,519	4,600
2/4/2002	19,809	4,727
3/4/2002	14,104	7,776
4/4/2002	14,495	9,384
5/4/2002	16,599	8,001
6/4/2002	15,733	7,596
7/4/2002	13,642	6,378
8/4/2002	14,052	7,673
9/4/2002	18,957	6,583
10/4/2002	17,470	5,016
11/4/2002	19,546	4,369
12/4/2002	18,737	4,635
13/4/2002	11,972	8,433
14/4/2002	12,817	8,358
15/4/2002	18,404	3,973
16/4/2002	18,108	3,596
17/4/2002	19,024	3,025
18/4/2002	15,473	5,647
19/4/2002	17,157	5,309
20/4/2002	17,355	4,237
21/4/2002	14,918	7,081
27/4/2002	11,211	6,770
28/4/2002	12,507	6,418
29/4/2002	17,615	3,531
30/4/2002	15,870	
Média de Abril	16,284	5,885
1/5/2002	9,833	6,670
2/5/2002	14,863	3,218
3/5/2002	12,272	5,812
4/5/2002	10,092	6,432
5/5/2002	10,952	8,264
6/5/2002	10,118	4,992
7/5/2002	10,566	5,936
8/5/2002	13,646	5,119
9/5/2002	8,676	7,225
10/5/2002	13,372	5,495
11/5/2002	13,710	4,883
12/5/2002	13,782	3,797
13/5/2002	13,107	3,634

14/5/2002	15,723	3,055
15/5/2002	16,755	1,900
16/5/2002	8,650	5,809
17/5/2002	12,092	5,295
18/5/2002	14,647	4,252
19/5/2002	3,992	3,509
20/5/2002	10,666	5,445
21/5/2002	8,042	5,686
22/5/2002	7,156	5,609
23/5/2002	14,330	5,211
24/5/2002	8,108	4,429
25/5/2002	14,544	3,838
26/5/2002	16,362	1,741
27/5/2002	14,533	3,116
28/5/2002	15,389	2,406
29/5/2002	12,288	5,502
30/5/2002	13,545	5,469
31/5/2002	8,150	5,690
Média de Maio	11,934	4,821
1/6/2002	10,456	5,758
2/6/2002	14,407	2,950
3/6/2002	14,485	2,129
4/6/2002	14,080	2,267
5/6/2002	15,310	1,729
6/6/2002	12,683	6,015
7/6/2002	14,676	2,348
8/6/2002	14,103	3,633
9/6/2002	13,765	2,970
10/6/2002	10,603	5,780
11/6/2002	13,405	3,104
12/6/2002	13,996	2,661
13/6/2002	13,315	3,291
14/6/2002	11,480	3,265
15/6/2002	4,706	4,532
16/6/2002	11,339	4,729
17/6/2002	13,931	2,629
18/6/2002	14,097	2,847
19/6/2002	13,043	4,041
20/6/2002	12,772	3,756
21/6/2002	13,994	2,300
22/6/2002	5,134	4,765
23/6/2002	6,691	5,652
24/6/2002	12,999	3,333
25/6/2002	6,798	5,173
26/6/2002	11,019	4,640
27/6/2002	12,267	3,978
28/6/2002	13,555	2,842
29/6/2002	14,133	2,234
30/6/2002	14,609	2,122
Média de Junho	12,262	3,582
1/7/2002	12,921	3,065
2/7/2002	13,270	4,126
3/7/2002	12,585	4,417
4/7/2002	13,616	3,102
5/7/2002	10,562	5,027
6/7/2002	11,098	6,586
7/7/2002	5,957	4,199
8/7/2002	14,731	3,312
9/7/2002	12,498	5,173
10/7/2002	12,133	5,111
11/7/2002	5,572	4,890
12/7/2002	3,200	2,987
13/7/2002	10,131	6,740
14/7/2002	15,329	2,436
15/7/2002	13,289	3,522
16/7/2002	15,073	2,621

17/7/2002	15,396	2,808
18/7/2002	5,832	5,099
19/7/2002	12,881	4,843
20/7/2002	10,793	5,498
21/7/2002	5,055	4,671
22/7/2002	7,054	6,038
23/7/2002	14,794	3,337
24/7/2002	12,106	4,526
25/7/2002	15,992	1,765
26/7/2002	13,661	4,919
27/7/2002	15,374	2,746
28/7/2002	10,429	4,459
29/7/2002	15,546	3,340
30/7/2002	15,166	3,330
31/7/2002	9,637	6,137
Média de Julho	11,667	4,220
1/8/2002	6,619	5,057
2/8/2002	5,708	5,312
3/8/2002	3,752	3,475
4/8/2002	16,921	3,358
5/8/2002	16,783	2,921
6/8/2002	12,846	3,641
7/8/2002	15,925	2,721
8/8/2002	16,619	2,680
9/8/2002	16,880	3,353
10/8/2002	16,383	4,222
11/8/2002	16,165	3,762
12/8/2002	14,256	3,717
13/8/2002	15,173	4,091
14/8/2002	15,793	4,509
15/8/2002	14,691	5,473
16/8/2002	15,473	5,077
17/8/2002	17,275	4,166
18/8/2002	18,387	2,820
19/8/2002	18,361	3,240
20/8/2002	17,924	3,728
21/8/2002	16,991	5,725
22/8/2002	11,564	8,035
23/8/2002	17,327	3,716
24/8/2002	17,541	4,411
25/8/2002	19,325	3,354
26/8/2002	16,079	6,731
27/8/2002	16,483	5,125
28/8/2002	19,830	3,641
29/8/2002	10,743	4,146
30/8/2002	10,481	7,484
31/8/2002	9,519	6,797
Média de Agosto	14,768	4,403
1/9/2002	17,764	4,893
2/9/2002	21,365	2,743
3/9/2002	21,292	2,892
4/9/2002	19,626	4,826
5/9/2002	12,917	8,867
6/9/2002	16,752	7,624
7/9/2002	6,354	5,718
8/9/2002	5,733	5,675
9/9/2002	13,979	8,594
10/9/2002	11,849	7,049
11/9/2002	20,552	6,199
12/9/2002	20,405	4,738
13/9/2002	5,462	5,044
14/9/2002	7,151	6,139
15/9/2002	16,776	8,514
16/9/2002	6,229	6,046
17/9/2002	20,587	5,046
18/9/2002	17,926	8,026
19/9/2002	18,056	9,724

20/9/2002	5,227	4,885
21/9/2002	3,067	3,054
22/9/2002	8,089	7,596
23/9/2002	4,802	4,795
24/9/2002	4,832	4,815
25/9/2002	18,680	9,060
26/9/2002	22,032	6,187
27/9/2002	20,855	7,204
28/9/2002	20,468	7,373
29/9/2002	20,289	8,513
30/9/2002	18,621	10,323
Média de Setembro	14,258	6,405
1/10/2002	3,864	3,431
2/10/2002	22,570	6,694
3/10/2002	19,927	9,847
4/10/2002	15,704	6,683
5/10/2002	22,545	7,190
6/10/2002	19,270	6,786
7/10/2002	23,964	5,412
8/10/2002	21,468	5,542
9/10/2002	18,182	7,055
10/10/2002	21,889	5,546
11/10/2002	22,503	5,646
12/10/2002	22,310	6,791
13/10/2002	22,537	7,137
14/10/2002	23,368	6,229
15/10/2002	16,101	9,280
17/10/2002	10,937	9,613
18/10/2002	10,684	9,603
19/10/2002	19,287	7,624
20/10/2002	24,234	7,870
21/10/2002	19,216	8,151
22/10/2002	7,456	7,169
23/10/2002	11,333	10,801
24/10/2002	22,732	10,402
25/10/2002	20,363	8,807
26/10/2002	21,609	10,555
27/10/2002	26,113	7,189
28/10/2002	21,203	7,013
29/10/2002	24,503	7,704
30/10/2002	7,564	7,443
31/10/2002	8,313	8,070
Média de Outubro	18,392	7,576
1/11/2002	14,764	9,532
2/11/2002	24,547	8,340
3/11/2002	29,207	2,812
4/11/2002	15,726	13,168
5/11/2002	6,330	6,289
6/11/2002	12,215	11,785
7/11/2002	15,242	11,849
8/11/2002	28,160	6,135
9/11/2002	28,913	4,425
10/11/2002	18,707	11,119
11/11/2002	16,360	12,640
12/11/2002	5,317	5,308
13/11/2002	2,424	2,420
14/11/2002	17,268	10,962
15/11/2002	21,942	10,997
16/11/2002	19,798	7,851
17/11/2002	24,842	7,496
18/11/2002	27,316	4,413
19/11/2002	22,241	9,076
20/11/2002	25,640	7,981
21/11/2002	27,274	6,731
22/11/2002	15,446	12,071
23/11/2002	18,897	12,935
24/11/2002	17,362	11,709

25/11/2002	19,653	12,727
26/11/2002	7,779	7,629
27/11/2002	22,276	10,759
28/11/2002	22,411	8,515
29/11/2002	24,219	9,213
30/11/2002	13,034	10,855
Média de Novembro	18,844	8,925
1/12/2002	26,466	6,329
2/12/2002	9,813	8,521
3/12/2002	11,397	10,202
4/12/2002	23,531	8,938
5/12/2002	20,582	11,525
6/12/2002	23,688	10,294
7/12/2002	22,146	13,052
8/12/2002	8,924	8,675
9/12/2002	11,068	11,000
10/12/2002	14,521	12,696
11/12/2002	12,733	11,513
12/12/2002	15,384	11,931
13/12/2002	19,465	8,700
14/12/2002	23,227	9,758
15/12/2002	18,375	14,449
16/12/2002	12,251	8,838
17/12/2002	15,982	10,887
18/12/2002	28,779	6,153
19/12/2002	26,876	7,738
20/12/2002	25,380	7,522
21/12/2002	19,666	12,481
22/12/2002	20,497	13,847
23/12/2002	26,185	8,017
24/12/2002	25,169	9,121
25/12/2002	10,040	9,790
26/12/2002	9,424	9,270
27/12/2002	27,694	6,029
28/12/2002	27,419	5,692
29/12/2002	30,566	4,451
30/12/2002	30,740	3,839
31/12/2002	27,450	6,487
Média de Dezembro	20,175	9,282

Data	Radiação Global (MJ/m ² .dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² .dia)
1/1/2003	17,057	10,020
2/1/2003	13,631	9,446
3/1/2003	10,307	9,005
4/1/2003	13,218	9,857
5/1/2003	15,564	12,653
6/1/2003	21,505	13,363
7/1/2003	29,289	4,585
8/1/2003	29,339	4,666
9/1/2003	27,791	5,832
10/1/2003	20,157	6,483
11/1/2003	26,960	8,692
12/1/2003	8,104	8,077
13/1/2003	3,405	3,392
14/1/2003	9,570	9,125
15/1/2003	18,324	12,364
16/1/2003	11,459	6,514
17/1/2003	22,055	9,781
18/1/2003	16,848	10,728
19/1/2003	23,052	11,738
20/1/2003	21,176	12,565
21/1/2003	9,721	6,968
22/1/2003	9,368	8,739
23/1/2003	13,221	11,480
24/1/2003	10,102	9,974
25/1/2003	7,426	7,395
26/1/2003	8,488	8,445
27/1/2003	9,726	9,639
28/1/2003	5,424	5,417
29/1/2003	10,164	9,993
30/1/2003	7,379	7,363
31/1/2003	8,977	8,868
Média de Janeiro	14,800	8,812
1/2/2003	24,694	9,467
2/2/2003	29,361	3,211
3/2/2003	25,004	6,390
4/2/2003	26,637	7,518
5/2/2003	26,042	5,633
6/2/2003	26,113	6,877
7/2/2003	14,563	5,497
8/2/2003	25,102	8,983
9/2/2003	25,617	7,291
10/2/2003	25,228	6,984
11/2/2003	26,771	8,132
12/2/2003	19,920	6,177
13/2/2003	23,326	8,475
15/2/2003	15,601	9,945
16/2/2003	18,856	11,543
17/2/2003	6,239	5,781
18/2/2003	13,025	9,884
19/2/2003	20,931	5,942
20/2/2003	20,436	9,394
21/2/2003	16,128	8,832
22/2/2003	21,037	11,237
23/2/2003	20,930	10,176
24/2/2003	20,415	7,525
25/2/2003	25,374	5,185
26/2/2003	26,016	4,111
27/2/2003	25,390	4,513
28/2/2003	24,722	5,214
Média de Fevereiro	21,981	7,404
1/3/2003	26,903	2,996
2/3/2003	27,153	3,541
3/3/2003	20,847	5,448

4/3/2003	21,223	5,680
5/3/2003	15,315	11,303
6/3/2003	17,853	7,125
7/3/2003	18,079	9,314
8/3/2003	7,970	7,884
9/3/2003	12,904	11,350
10/3/2003	12,791	10,247
11/3/2003	10,728	9,370
12/3/2003	11,052	9,393
13/3/2003	17,954	8,125
14/3/2003	21,007	7,334
15/3/2003	20,908	9,180
16/3/2003	21,209	6,627
17/3/2003	9,194	8,074
18/3/2003	13,269	10,667
19/3/2003	17,148	5,635
20/3/2003	19,963	5,614
21/3/2003	6,901	6,315
22/3/2003	11,489	9,155
23/3/2003	10,763	9,809
24/3/2003	9,708	9,113
25/3/2003	15,576	8,808
26/3/2003	9,016	8,245
27/3/2003	15,521	9,325
28/3/2003	15,030	9,474
29/3/2003	19,197	6,597
30/3/2003	19,559	4,924
31/3/2003	17,157	5,709
Média de Março	15,916	7,819
1/4/2003	18,380	9,235
10/4/2003	5,048	4,905
11/4/2003	8,112	7,033
12/4/2003	19,232	5,418
13/4/2003	21,634	3,865
14/4/2003	20,931	3,327
15/4/2003	10,786	8,819
16/4/2003	16,031	6,289
17/4/2003	17,675	5,696
18/4/2003	18,745	5,274
19/4/2003	11,970	6,736
20/4/2003	8,070	7,358
21/4/2003	7,620	7,024
22/4/2003	16,373	5,111
23/4/2003	18,090	3,750
24/4/2003	18,426	2,696
25/4/2003	18,768	2,143
26/4/2003	17,459	3,468
27/4/2003	18,278	2,862
28/4/2003	17,557	3,589
29/4/2003	14,776	4,542
30/4/2003	15,493	5,154
Média de Abril	15,430	5,195
1/5/2003	15,644	6,612
2/5/2003	4,222	4,055
3/5/2003	13,412	5,949
4/5/2003	14,094	7,582
5/5/2003	3,725	3,604
6/5/2003	10,332	5,639
7/5/2003	19,058	1,915
8/5/2003	18,011	1,882
9/5/2003	11,397	7,337
10/5/2003	10,037	6,599
11/5/2003	16,820	3,427
12/5/2003	16,051	3,882
13/5/2003	15,039	4,160
14/5/2003	13,377	4,523

15/5/2003	12,948	3,874
16/5/2003	12,442	4,460
17/5/2003	16,793	1,916
18/5/2003	15,705	3,568
19/5/2003	15,789	2,616
21/5/2003	14,665	3,923
22/5/2003	15,207	2,580
23/5/2003	7,558	5,079
24/5/2003	15,492	3,070
25/5/2003	16,972	1,352
26/5/2003	16,296	1,683
27/5/2003	12,462	6,376
28/5/2003	13,714	4,313
31/5/2003	14,455	3,181
Média de Maio	13,633	4,113
1/6/2003	15,028	2,516
2/6/2003	15,579	1,713
3/6/2003	10,577	6,527
4/6/2003	7,125	4,535
5/6/2003	5,170	4,816
6/6/2003	12,725	3,856
7/6/2003	12,672	4,088
8/6/2003	7,980	6,264
9/6/2003	11,065	4,500
10/6/2003	14,311	2,476
11/6/2003	14,792	2,252
12/6/2003	12,333	2,998
13/6/2003	13,671	2,922
14/6/2003	13,509	3,628
15/6/2003	12,955	3,520
16/6/2003	11,242	3,897
17/6/2003	12,126	3,687
18/6/2003	9,970	5,086
19/6/2003	13,874	3,555
20/6/2003	13,432	4,118
21/6/2003	13,524	3,321
22/6/2003	12,793	3,331
23/6/2003	14,391	2,512
24/6/2003	13,224	2,575
25/6/2003	13,193	3,118
26/6/2003	14,005	2,814
27/6/2003	12,552	3,741
28/6/2003	14,539	2,375
29/6/2003	14,363	2,610
30/6/2003	12,706	3,846
Média de Junho	12,514	3,573
1/7/2003	13,016	2,780
2/7/2003	14,452	2,110
3/7/2003	13,586	3,087
4/7/2003	14,216	2,816
5/7/2003	14,851	2,406
6/7/2003	13,299	4,442
7/7/2003	10,282	4,678
8/7/2003	14,526	2,258
9/7/2003	14,909	2,351
10/7/2003	1,680	1,535
11/7/2003	2,630	2,542
12/7/2003	2,864	2,772
13/7/2003	7,568	5,737
14/7/2003	10,007	5,573
15/7/2003	14,626	2,949
16/7/2003	14,331	2,752
17/7/2003	5,666	5,196
18/7/2003	13,312	3,521
19/7/2003	15,172	2,382
20/7/2003	15,732	2,091

21/7/2003	16,181	1,858
22/7/2003	14,258	3,809
23/7/2003	15,669	2,247
24/7/2003	15,585	2,003
25/7/2003	14,572	3,374
26/7/2003	12,953	5,815
27/7/2003	6,473	6,001
28/7/2003	11,089	7,710
29/7/2003	13,475	4,527
30/7/2003	10,089	4,927
31/7/2003	14,727	4,886
Média de Julho	11,994	3,585
1/8/2003	13,632	5,307
2/8/2003	15,564	4,654
3/8/2003	15,973	4,021
4/8/2003	15,854	3,529
5/8/2003	17,225	2,566
6/8/2003	10,620	5,606
7/8/2003	3,508	3,314
8/8/2003	9,330	6,400
9/8/2003	2,231	2,202
10/8/2003	8,834	5,766
11/8/2003	18,351	3,027
12/8/2003	16,747	3,953
13/8/2003	16,695	3,845
14/8/2003	16,936	3,875
15/8/2003	8,893	5,179
16/8/2003	10,244	6,477
17/8/2003	17,432	4,095
18/8/2003	19,423	2,210
19/8/2003	19,315	2,307
20/8/2003	19,022	2,542
21/8/2003	18,483	2,791
22/8/2003	18,617	2,953
23/8/2003	18,364	3,228
24/8/2003	19,141	2,910
25/8/2003	1,494	1,437
26/8/2003	3,818	3,750
27/8/2003	8,606	6,689
28/8/2003	2,487	2,457
29/8/2003	3,510	3,478
30/8/2003	12,218	8,460
31/8/2003	3,804	3,762
Média de Agosto	12,464	3,961
1/9/2003	19,947	4,756
2/9/2003	14,831	9,449
3/9/2003	20,201	4,983
4/9/2003	18,959	4,695
6/9/2003	21,085	3,297
7/9/2003	20,444	4,013
8/9/2003	19,642	4,424
9/9/2003	5,099	4,736
10/9/2003	2,116	2,048
11/9/2003	3,444	3,409
12/9/2003	14,469	8,019
13/9/2003	4,588	4,317
14/9/2003	6,289	6,021
15/9/2003	19,259	4,856
16/9/2003	5,377	4,590
17/9/2003	12,591	9,356
18/9/2003	11,643	8,713
19/9/2003	22,160	4,421
20/9/2003	22,047	4,295
21/9/2003	18,085	7,682
22/9/2003	21,583	5,483
23/9/2003	21,781	4,893
24/9/2003	20,377	6,334

25/9/2003	8,274	7,963
26/9/2003	3,125	3,084
27/9/2003	7,610	6,072
28/9/2003	22,656	5,682
29/9/2003	10,337	8,904
30/9/2003	20,567	9,634
Média de Setembro	14,434	5,728
1/10/2003	21,253	6,055
2/10/2003	21,832	6,626
3/10/2003	16,802	6,816
4/10/2003	24,144	5,241
5/10/2003	23,760	5,145
6/10/2003	14,176	10,556
7/10/2003	5,094	5,070
8/10/2003	19,721	9,411
9/10/2003	20,238	6,170
10/10/2003	9,054	8,828
11/10/2003	3,414	3,411
12/10/2003	14,050	11,398
13/10/2003	19,804	8,048
14/10/2003	11,865	11,057
15/10/2003	24,607	8,469
16/10/2003	27,763	3,050
17/10/2003	27,270	3,139
18/10/2003	24,754	6,386
19/10/2003	25,542	6,333
20/10/2003	10,750	10,116
21/10/2003	11,149	8,804
22/10/2003	13,168	10,592
23/10/2003	3,802	3,778
25/10/2003	24,872	7,228
26/10/2003	20,559	9,079
27/10/2003	3,141	3,102
28/10/2003	5,184	5,174
29/10/2003	10,037	9,049
30/10/2003	21,832	11,438
31/10/2003	24,970	7,797
Média de Outubro	16,820	7,246
1/11/2003	16,946	9,169
2/11/2003	5,776	5,740
3/11/2003	14,613	11,273
4/11/2003	18,538	11,827
5/11/2003	17,411	12,078
6/11/2003	11,132	10,322
7/11/2003	17,757	8,202
8/11/2003	24,333	8,549
9/11/2003	27,277	6,215
10/11/2003	27,896	4,396
11/11/2003	27,167	5,602
12/11/2003	25,123	6,902
13/11/2003	8,517	7,893
14/11/2003	16,866	11,340
15/11/2003	22,101	11,252
16/11/2003	24,667	8,531
17/11/2003	9,932	8,766
18/11/2003	24,137	9,756
19/11/2003	12,290	10,618
20/11/2003	26,652	7,049
21/11/2003	6,894	6,805
22/11/2003	17,562	14,499
23/11/2003	19,018	9,344
24/11/2003	15,957	13,626
25/11/2003	26,860	7,516
26/11/2003	15,738	12,048
27/11/2003	18,685	12,996
28/11/2003	6,667	6,638
29/11/2003	8,460	8,283

30/11/2003	18,076	14,361
Média de Novembro	17,768	9,387
1/12/2003	11,828	10,902
3/12/2003	21,910	9,295
4/12/2003	12,077	10,607
5/12/2003	22,394	12,281
6/12/2003	11,918	10,877
7/12/2003	18,984	13,769
8/12/2003	17,784	13,667
9/12/2003	6,119	6,084
10/12/2003	23,232	11,961
11/12/2003	22,928	13,808
12/12/2003	12,605	12,331
13/12/2003	21,551	13,953
14/12/2003	25,855	10,780
15/12/2003	28,217	6,471
16/12/2003	25,817	7,770
17/12/2003	9,325	9,315
18/12/2003	8,597	8,593
19/12/2003	21,469	11,752
20/12/2003	15,752	4,546
21/12/2003	15,209	10,242
22/12/2003	27,015	7,367
23/12/2003	10,254	8,529
24/12/2003	8,225	8,220
25/12/2003	13,920	13,506
26/12/2003	18,990	13,219
27/12/2003	21,403	11,001
28/12/2003	22,617	7,592
29/12/2003	19,921	6,282
30/12/2003	24,100	9,294
31/12/2003	16,780	7,644
Média de Dezembro	17,893	10,055

Data	Radiação Global (MJ/m ² dia)	Radiação Difusa (MJ/m ² dia)
1/1/2004	8,108	8,105
2/1/2004	9,645	9,640
3/1/2004	17,518	11,908
4/1/2004	22,211	11,417
5/1/2004	23,668	9,706
6/1/2004	19,520	13,726
7/1/2004	9,542	9,331
8/1/2004	7,782	7,527
9/1/2004	9,732	9,131
10/1/2004	24,560	10,272
11/1/2004	27,026	6,522
12/1/2004	17,141	12,658
13/1/2004	19,454	13,659
14/1/2004	20,214	11,746
15/1/2004	17,168	10,403
16/1/2004	18,954	12,375
17/1/2004	22,542	13,024
18/1/2004	30,132	4,983
19/1/2004	20,648	11,842
20/1/2004	17,941	11,713
21/1/2004	5,906	5,897
22/1/2004	8,650	8,635
23/1/2004	16,033	9,226
24/1/2004	10,640	9,899
25/1/2004	14,924	12,649
26/1/2004	4,697	4,676
27/1/2004	5,838	5,825
28/1/2004	8,223	8,186
29/1/2004	14,058	10,870
30/1/2004	23,108	6,027
31/1/2004	18,197	8,097
Média de Janeiro	15,928	9,667
1/2/2004	24,192	7,063
2/2/2004	26,096	5,752
3/2/2004	14,251	7,089
4/2/2004	22,922	6,657
5/2/2004	19,801	11,180
6/2/2004	6,600	6,593
7/2/2004	15,842	10,752
8/2/2004	23,005	8,524
9/2/2004	18,682	11,994
10/2/2004	21,952	9,972
11/2/2004	18,696	11,007
12/2/2004	22,098	8,775
13/2/2004	20,705	7,659
14/2/2004	9,342	8,537
15/2/2004	17,760	8,959
16/2/2004	17,825	9,681
17/2/2004	24,222	6,330
18/2/2004	24,942	6,296
19/2/2004	19,695	8,127
21/2/2004	9,961	9,152
22/2/2004	4,776	4,766
23/2/2004	5,428	5,420
24/2/2004	7,314	7,258
25/2/2004	5,990	5,972
26/2/2004	8,778	8,207
27/2/2004	23,862	4,933
28/2/2004	25,753	5,645
29/2/2004	23,673	5,221
Média de Fevereiro	17,292	7,769
1/3/2004	19,832	6,863
2/3/2004	24,958	5,474
3/3/2004	14,336	7,401
4/3/2004	6,957	6,694
5/3/2004	6,061	6,033
6/3/2004	7,360	6,843
7/3/2004	18,960	9,540
8/3/2004	20,885	4,777
9/3/2004	24,334	4,244
10/3/2004	14,825	5,544
11/3/2004	16,182	9,635
12/3/2004	10,414	8,806
13/3/2004	14,614	9,491
14/3/2004	6,910	5,792
15/3/2004	17,761	7,131
16/3/2004	21,593	7,928
17/3/2004	22,301	5,721
18/3/2004	18,531	8,641
19/3/2004	16,719	7,719
20/3/2004	11,462	7,557
21/3/2004	12,038	8,474
22/3/2004	17,860	7,545
23/3/2004	10,146	8,783
24/3/2004	19,121	8,796
25/3/2004	21,825	5,637
26/3/2004	15,835	7,828
27/3/2004	20,684	4,982
28/3/2004	19,594	6,345
29/3/2004	14,209	6,100
30/3/2004	11,092	7,500
31/3/2004	18,818	7,567
Média de Março	16,007	7,142
1/4/2004	18,906	6,027
2/4/2004	21,065	3,342
3/4/2004	19,748	6,903
4/4/2004	5,365	5,149
13/4/2004	12,826	8,660
14/4/2004	4,568	4,393
15/4/2004	14,549	6,427
16/4/2004	16,620	7,860
17/4/2004	18,752	3,524
18/4/2004	17,239	5,498
19/4/2004	14,694	4,492
20/4/2004	8,664	7,391
21/4/2004	7,256	6,697
22/4/2004	16,681	4,309
23/4/2004	18,083	4,390
24/4/2004	10,377	6,374
25/4/2004	5,857	5,585
26/4/2004	8,443	7,391
27/4/2004	14,883	5,847
28/4/2004	16,352	5,298
29/4/2004	18,254	2,367
30/4/2004	3,534	0,866
Média de Abril	13,305	5,400
1/5/2004	15,324	5,373
2/5/2004	17,635	3,196
3/5/2004	12,658	3,577
4/5/2004	14,692	5,153
5/5/2004	12,354	7,253
6/5/2004	6,209	5,757
7/5/2004	7,163	4,969
8/5/2004	12,106	5,803
9/5/2004	12,780	6,050
10/5/2004	11,765	6,712
11/5/2004	13,319	6,155
12/5/2004	15,196	3,647
13/5/2004	5,709	5,199
14/5/2004	6,188	5,076
15/5/2004	4,447	3,875
16/5/2004	17,120	1,911
17/5/2004	14,829	3,853
18/5/2004	5,179	4,576
19/5/2004	4,300	4,066
20/5/2004	3,084	2,983
21/5/2004	6,325	5,893
22/5/2004	7,785	6,368
23/5/2004	11,146	6,015
24/5/2004	6,146	5,014
25/5/2004	5,333	4,865
26/5/2004	14,194	4,187
27/5/2004	15,540	2,485
28/5/2004	10,935	6,140
29/5/2004	14,404	4,104
30/5/2004	8,968	5,466
31/5/2004	1,607	1,541
Média de Maio	10,143	4,750
1/6/2004	12,663	4,017
2/6/2004	6,700	5,214
3/6/2004	3,771	3,555
4/6/2004	9,582	4,889
5/6/2004	10,730	6,339
6/6/2004	15,283	2,216
7/6/2004	13,302	4,185
8/6/2004	12,215	3,808
9/6/2004	2,384	2,189
10/6/2004	10,675	7,231
11/6/2004	9,784	5,610
12/6/2004	2,031	1,888
13/6/2004	12,597	5,630
14/6/2004	9,122	4,926
15/6/2004	7,082	5,282
16/6/2004	11,908	3,195
17/6/2004	13,979	2,416
18/6/2004	14,062	2,075
19/6/2004	13,199	3,147
20/6/2004	14,587	2,423
21/6/2004	13,408	2,756
22/6/2004	12,971	3,637
23/6/2004	12,325	3,159
24/6/2004	10,957	6,334
25/6/2004	7,360	5,786
26/6/2004	10,092	5,108
27/6/2004	10,215	5,853
28/6/2004	9,343	4,717
29/6/2004	13,053	2,811
30/6/2004	10,149	2,636
Média de Junho	10,518	4,101
1/7/2004	13,462	2,475
2/7/2004	14,031	2,145
3/7/2004	14,448	2,019
4/7/2004	11,504	5,290
5/7/2004	6,264	4,987
8/7/2004	6,457	4,986
9/7/2004	5,734	5,108
10/7/2004	3,208	2,278
11/7/2004	2,322	2,246
12/7/2004	8,133	5,026
13/7/2004	13,000	4,615
14/7/2004	14,987	3,214
15/7/2004	15,005	2,429
16/7/2004	10,206	5,665
17/7/2004	4,340	4,195
18/7/2004	4,473	4,271

19/7/2004	1,627	1,571
20/7/2004	8,078	6,791
21/7/2004	15,967	3,047
22/7/2004	5,575	4,616
23/7/2004	11,036	5,240
24/7/2004	16,300	2,453
25/7/2004	16,594	3,639
26/7/2004	15,898	2,961
27/7/2004	16,893	2,200
28/7/2004	15,960	2,960
29/7/2004	15,784	3,185
30/7/2004	10,207	6,787
31/7/2004	15,067	4,413
Média de Julho	10,778	3,821
1/8/2004	16,704	6,496
2/8/2004	13,502	4,407
3/8/2004	13,331	5,747
4/8/2004	10,640	7,488
5/8/2004	16,915	2,799
6/8/2004	17,508	2,381
7/8/2004	12,708	4,559
8/8/2004	2,941	2,838
9/8/2004	17,317	3,759
10/8/2004	16,508	5,253
11/8/2004	17,299	4,250
12/8/2004	14,047	6,240
13/8/2004	18,352	3,508
14/8/2004	17,463	2,820
15/8/2004	18,963	2,399
16/8/2004	18,600	2,534
17/8/2004	17,643	4,001
18/8/2004	18,076	2,817
19/8/2004	17,170	3,711
20/8/2004	18,272	2,889
21/8/2004	18,171	3,285
22/8/2004	15,365	6,905
23/8/2004	17,901	4,454
24/8/2004	9,627	8,163
25/8/2004	16,727	6,811
26/8/2004	4,120	4,006
27/8/2004	3,148	3,093
28/8/2004	6,090	5,057
29/8/2004	20,959	2,341
30/8/2004	21,070	1,993
31/8/2004	20,585	2,945
Média de Agosto	15,088	4,192
1/9/2004	20,001	3,659
2/9/2004	20,242	3,283
3/9/2004	17,026	5,812
4/9/2004	15,981	7,730
5/9/2004	20,239	4,233
6/9/2004	20,563	3,794
7/9/2004	21,317	3,614
8/9/2004	20,488	3,492
9/9/2004	21,246	3,369
10/9/2004	19,510	5,288
11/9/2004	16,473	9,680
12/9/2004	8,866	8,549
13/9/2004	18,051	6,753
14/9/2004	16,988	6,114
15/9/2004	15,353	8,946
16/9/2004	16,797	9,321
17/9/2004	9,751	8,224
18/9/2004	16,367	8,671
19/9/2004	21,719	7,146
20/9/2004	20,783	6,046

21/9/2004	20,310	5,735
22/9/2004	22,201	5,759
23/9/2004	20,116	7,690
24/9/2004	21,014	6,409
25/9/2004	13,062	10,752
26/9/2004	21,683	6,352
27/9/2004	20,383	6,935
28/9/2004	21,545	6,104
29/9/2004	15,091	9,505
30/9/2004	4,170	4,096
Média de Setembro	17,911	6,435

ANEXO III - PLANILHA DO PLANEJAMENTO FATORIAL 2² COM
6 REPETIÇÕES DO PONTO CENTRAL

Hora: 9:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	9	1	-1	1,5	-1	20	704,4	26,5	65,4	10,0
	3	2	+1	4,5	-1	20	704,4	26,0	53,5	4,5
	4	3	-1	1,5	+1	60	702,6	28,3	53,2	4,7
	6	4	+1	4,5	+1	60	704,4	26,2	50,9	1,1
	8	5	0	3,0	0	40	704,6	25,6	65,0	4,6
	10	6	0	3,0	0	40	703,6	26,7	62,4	5,0
	7	7	0	3,0	0	40	704,8	26,4	58,3	4,9
	1	8	0	3,0	0	40	705,0	22,4	63,6	4,3
	2	9	0	3,0	0	40	705,8	26,1	57,2	4,7
5	10	0	3,0	0	40	704,2	25,1	55,0	3,4	

Hora: 10:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	6	1	-1	1,5	-1	20	704,4	26,8	46,2	14,2
	9	2	+1	4,5	-1	20	704,22	26,8	64,4	4,2
	10	3	-1	1,5	+1	60	703,4	29,2	44,1	7,4
	5	4	+1	4,5	+1	60	704,2	27,2	45,2	2,0
	1	5	0	3,0	0	40	704,9	24,9	57,2	8,0
	8	6	0	3,0	0	40	704,6	27,5	51,1	6,8
	2	7	0	3,0	0	40	705,8	28,2	51,2	4,6
	3	8	0	3,0	0	40	704,3	27,9	43,5	7,9
	7	9	0	3,0	0	40	704,6	28,1	50,3	6,3
4	10	0	3,0	0	40	702,6	30,1	42,1	4,7	

Hora: 11:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	8	1	-1	1,5	-1	20	704,4	29,9	49,7	16,5
	10	2	+1	4,5	-1	20	703,4	30,9	43,7	6,0
	4	3	-1	1,5	+1	60	702,4	30,9	38,5	11,8
	1	4	+1	4,5	+1	60	704,8	29,4	46,4	5,2
	6	5	0	3,0	0	40	704,4	30,8	35,4	7,9
	5	6	0	3,0	0	40	704,2	29,2	35,4	7,3
	2	7	0	3,0	0	40	705,4	29,9	41,5	5,6
	7	8	0	3,0	0	40	704,2	30,7	48,9	5,6
	3	9	0	3,0	0	40	704,2	31,2	29,7	7,7
9	10	0	3,0	0	40	704,2	29,5	55,6	5,9	

Hora: 12:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	5	1	-1	1,5	-1	20	703,4	30,2	39,4	20,7
	4	2	+1	4,5	-1	20	702,2	32,9	36,0	6,7
	6	3	-1	1,5	+1	60	704,4	30,7	37,0	15,2
	9	4	+1	4,5	+1	60	704,0	31,3	45,9	6,4
	2	5	0	3,0	0	40	705,2	32,8	36,4	6,7
	10	6	0	3,0	0	40	703,2	32,5	38,1	10,8
	1	7	0	3,0	0	40	704,8	31,2	42,3	11,1
	7	8	0	3,0	0	40	704,2	31,2	44,8	8,2
	3	9	0	3,0	0	40	703,4	31,8	30,6	9,7
8	10	0	3,0	0	40	704,1	31,2	47,2	11,1	

Hora: 13:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	3	1	-1	1,5	-1	20	703,2	33,3	28,6	16,7
	7	2	+1	4,5	-1	20	703,6	30,4	55,2	7,0
	2	3	-1	1,5	+1	60	704,8	32,4	33,3	15,1
	9	4	+1	4,5	+1	60	703,8	32,1	42,5	5,3
	1	5	0	3,0	0	40	704,8	28,8	53,4	6,5
	4	6	0	3,0	0	40	701,2	32,7	34,8	11,7
	10	7	0	3,0	0	40	703,0	33,1	35,3	9,6
	5	8	0	3,0	0	40	703,4	32,1	39,8	9,9
	6	9	0	3,0	0	40	704,4	31,3	46,2	9,3
	8	10	0	3,0	0	40	703,8	31,4	46,3	7,0

Hora: 14:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	8	1	-1	1,5	-1	20	703,6	30,5	44,1	16,4
	1	2	+1	4,5	-1	20	704,5	28,8	54,1	9,7
	3	3	-1	1,5	+1	60	702,6	34,4	27,7	14,7
	9	4	+1	4,5	+1	60	703,8	32,0	42,3	10,7
	4	5	0	3,0	0	40	701,0	33,4	32,8	8,0
	2	6	0	3,0	0	40	704,0	32,1	31,2	4,7
	10	7	0	3,0	0	40	702,8	33,1	34,4	7,2
	5	8	0	3,0	0	40	703,2	32,4	33,2	10,6
	6	9	0	3,0	0	40	704,2	31,4	50,0	8,4
	7	10	0	3,0	0	40	703,2	30,5	62,5	8,4

Hora: 15:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	10	1	-1	1,5	-1	20	702,4	30,6	37,7	20,9
	8	2	+1	4,5	-1	20	703,6	29,3	58,0	9,5
	3	3	-1	1,5	+1	60	702,4	32,5	26,9	8,8
	1	4	+1	4,5	+1	60	704,4	28,6	54,1	6,1
	2	5	0	3,0	0	40	704,0	30,0	50,2	6,4
	5	6	0	3,0	0	40	702,6	31,7	35,1	5,8
	4	7	0	3,0	0	40	700,8	31,7	38,7	6,4
	6	8	0	3,0	0	40	703,8	30,4	51,6	7,8
	7	9	0	3,0	0	40	703,2	27,3	68,2	8,1
	9	10	0	3,0	0	40	703,6	31,5	48,2	6,6

Hora: 16:00 horas	Ordem Aleatória	Ordem Padrão	Vazão Codif.	Vazão (g/s)	Ângulo Codif.	Ângulo	P _{amb} (mmHg)	T _{amb} (°C)	UR (%)	% Evap. (%)
	2	1	-1	1,5	-1	20	703,9	28,3	54,5	11,97
	7	2	+1	4,5	-1	20	703,0	25,2	72,5	7,0
	3	3	-1	1,5	+1	60	701,3	30,4	34,1	10,8
	1	4	+1	4,5	+1	60	704,3	26,2	58,8	5,1
	8	5	0	3,0	0	40	703,2	28,7	62,3	5,6
	5	6	0	3,0	0	40	702,4	30,9	38,7	9,2
	6	7	0	3,0	0	40	703,8	29,8	53,2	5,0
	10	8	0	3,0	0	40	702,2	29,8	42,1	4,6
	4	9	0	3,0	0	40	700,6	30,8	37,3	5,8
	9	10	0	3,0	0	40	703,4	30,2	51,3	5,6

ANEXO IV - CÁLCULOS DA DECLINAÇÃO SOLAR

	Dia do Mês	Dia do Ano	Declin.	Dia do Mês bissexto	Dia do Ano bissexto	Declin. bissexto
Janeiro	1	1	-23,01	1	1	-23,01
	2	2	-22,93	2	2	-22,93
	3	3	-22,84	3	3	-22,84
	4	4	-22,75	4	4	-22,75
	5	5	-22,65	5	5	-22,65
	6	6	-22,54	6	6	-22,54
	7	7	-22,42	7	7	-22,42
	8	8	-22,30	8	8	-22,30
	9	9	-22,17	9	9	-22,17
	10	10	-22,04	10	10	-22,04
	11	11	-21,90	11	11	-21,90
	12	12	-21,75	12	12	-21,75
	13	13	-21,60	13	13	-21,60
	14	14	-21,44	14	14	-21,44
	15	15	-21,27	15	15	-21,27
	16	16	-21,10	16	16	-21,10
	17	17	-20,92	17	17	-20,92
	18	18	-20,73	18	18	-20,73
	19	19	-20,54	19	19	-20,54
	20	20	-20,34	20	20	-20,34
	21	21	-20,14	21	21	-20,14
	22	22	-19,93	22	22	-19,93
	23	23	-19,71	23	23	-19,71
	24	24	-19,49	24	24	-19,49
	25	25	-19,26	25	25	-19,26
	26	26	-19,03	26	26	-19,03
	27	27	-18,79	27	27	-18,79
	28	28	-18,55	28	28	-18,55
	29	29	-18,30	29	29	-18,30
	30	30	-18,04	30	30	-18,04
	31	31	-17,78	31	31	-17,78
Média			-20,85			-20,85
Média de Janeiro			-20,85			
Fevereiro	1	32	-17,52	1	32	-17,52
	2	33	-17,25	2	33	-17,25
	3	34	-16,97	3	34	-16,97
	4	35	-16,69	4	35	-16,69
	5	36	-16,40	5	36	-16,40
	6	37	-16,11	6	37	-16,11
	7	38	-15,82	7	38	-15,82
	8	39	-15,52	8	39	-15,52
	9	40	-15,21	9	40	-15,21
	10	41	-14,90	10	41	-14,90
	11	42	-14,59	11	42	-14,59
	12	43	-14,27	12	43	-14,27
	13	44	-13,95	13	44	-13,95
	14	45	-13,62	14	45	-13,62
	15	46	-13,29	15	46	-13,29
	16	47	-12,95	16	47	-12,95
	17	48	-12,62	17	48	-12,62
	18	49	-12,27	18	49	-12,27
	19	50	-11,93	19	50	-11,93
	20	51	-11,58	20	51	-11,58
	21	52	-11,23	21	52	-11,23
	22	53	-10,87	22	53	-10,87
	23	54	-10,51	23	54	-10,51
	24	55	-10,15	24	55	-10,15
	25	56	-9,78	25	56	-9,78
	26	57	-9,41	26	57	-9,41
	27	58	-9,04	27	58	-9,04
	28	59	-8,67	28	59	-8,67
				29	60	-8,29
Média			-13,33			-13,15
Média de Fevereiro			-13,24			
Março	1	60	-8,29	1	61	-7,91
Abril	2	61	-7,91	2	62	-7,53
	3	62	-7,53	3	63	-7,15
	4	63	-7,15	4	64	-6,76
	5	64	-6,76	5	65	-6,38
	6	65	-6,38	6	66	-5,99
	7	66	-5,99	7	67	-5,60
	8	67	-5,60	8	68	-5,20
	9	68	-5,20	9	69	-4,81
	10	69	-4,81	10	70	-4,41
	11	70	-4,41	11	71	-4,02
	12	71	-4,02	12	72	-3,62
	13	72	-3,62	13	73	-3,22
	14	73	-3,22	14	74	-2,82
	15	74	-2,82	15	75	-2,42
	16	75	-2,42	16	76	-2,02
	17	76	-2,02	17	77	-1,61
	18	77	-1,61	18	78	-1,21
	19	78	-1,21	19	79	-0,81
	20	79	-0,81	20	80	-0,40
	21	80	-0,40	21	81	0,00
	22	81	0,00	22	82	0,40
	23	82	0,40	23	83	0,81
	24	83	0,81	24	84	1,21
	25	84	1,21	25	85	1,61
	26	85	1,61	26	86	2,02
	27	86	2,02	27	87	2,42
	28	87	2,42	28	88	2,82
	29	88	2,82	29	89	3,22
	30	89	3,22	30	90	3,62
	31	90	3,62	31	91	4,02
	Média			-2,39		
Média de Março			-2,19			
Abril	1	91	4,02	1	92	4,41
	2	92	4,41	2	93	4,81
	3	93	4,81	3	94	5,20
	4	94	5,20	4	95	5,60
	5	95	5,60	5	96	5,99
	6	96	5,99	6	97	6,38
	7	97	6,38	7	98	6,77
	8	98	6,77	8	99	7,15
	9	99	7,15	9	100	7,53
	10	100	7,53	10	101	7,92
	11	101	7,92	11	102	8,29
	12	102	8,29	12	103	8,67
	13	103	8,67	13	104	9,04
	14	104	9,04	14	105	9,42
	15	105	9,42	15	106	9,78
	16	106	9,78	16	107	10,15
	17	107	10,15	17	108	10,51
	18	108	10,51	18	109	10,87
	19	109	10,87	19	110	11,23
	20	110	11,23	20	111	11,58
	21	111	11,58	21	112	11,93
	22	112	11,93	22	113	12,27
	23	113	12,27	23	114	12,62
	24	114	12,62	24	115	12,95
	25	115	12,95	25	116	13,29
	26	116	13,29	26	117	13,62
	27	117	13,62	27	118	13,95
	28	118	13,95	28	119	14,27
	29	119	14,27	29	120	14,59
	30	120	14,59	30	121	14,90
Média			9,49			9,86
Média de Abril			9,67			
Maio	1	121	14,90	1	122	15,21
	2	122	15,21	2	123	15,52
	3	123	15,52	3	124	15,82

	4	124	15,82	4	125	16,11		7	188	22,59	7	189	22,48
	5	125	16,11	5	126	16,40		8	189	22,48	8	190	22,36
	6	126	16,40	6	127	16,69		9	190	22,36	9	191	22,24
	7	127	16,69	7	128	16,97		10	191	22,24	10	192	22,11
	8	128	16,97	8	129	17,25		11	192	22,11	11	193	21,97
	9	129	17,25	9	130	17,52		12	193	21,97	12	194	21,83
	10	130	17,52	10	131	17,78		13	194	21,83	13	195	21,67
	11	131	17,78	11	132	18,04		14	195	21,67	14	196	21,52
	12	132	18,04	12	133	18,30		15	196	21,52	15	197	21,35
	13	133	18,30	13	134	18,55		16	197	21,35	16	198	21,18
	14	134	18,55	14	135	18,79		17	198	21,18	17	199	21,01
	15	135	18,79	15	136	19,03		18	199	21,01	18	200	20,82
	16	136	19,03	16	137	19,26		19	200	20,82	19	201	20,64
	17	137	19,26	17	138	19,49		20	201	20,64	20	202	20,44
	18	138	19,49	18	139	19,71		21	202	20,44	21	203	20,24
	19	139	19,71	19	140	19,93		22	203	20,24	22	204	20,03
	20	140	19,93	20	141	20,14		23	204	20,03	23	205	19,82
	21	141	20,14	21	142	20,34		24	205	19,82	24	206	19,60
	22	142	20,34	22	143	20,54		25	206	19,60	25	207	19,38
	23	143	20,54	23	144	20,73		26	207	19,38	26	208	19,15
	24	144	20,73	24	145	20,92		27	208	19,15	27	209	18,91
	25	145	20,92	25	146	21,10		28	209	18,91	28	210	18,67
	26	146	21,10	26	147	21,27		29	210	18,67	29	211	18,42
	27	147	21,27	27	148	21,44		30	211	18,42	30	212	18,17
	28	148	21,44	28	149	21,60		31	212	18,17	31	213	17,91
	29	149	21,60	29	150	21,75							
	30	150	21,75	30	151	21,90							
	31	151	21,90	31	152	22,04							
Média			18,81			19,04				21,10			20,93
Média de Maio			18,92				Média de Julho			21,02			
Junho	1	152	22,04	1	153	22,17	Agosto	1	213	17,91	1	214	17,65
	2	153	22,17	2	154	22,30		2	214	17,65	2	215	17,38
	3	154	22,30	3	155	22,42		3	215	17,38	3	216	17,11
	4	155	22,42	4	156	22,54		4	216	17,11	4	217	16,83
	5	156	22,54	5	157	22,65		5	217	16,83	5	218	16,55
	6	157	22,65	6	158	22,75		6	218	16,55	6	219	16,26
	7	158	22,75	7	159	22,84		7	219	16,26	7	220	15,96
	8	159	22,84	8	160	22,93		8	220	15,96	8	221	15,67
	9	160	22,93	9	161	23,01		9	221	15,67	9	222	15,36
	10	161	23,01	10	162	23,09		10	222	15,36	10	223	15,06
	11	162	23,09	11	163	23,15		11	223	15,06	11	224	14,74
	12	163	23,15	12	164	23,21		12	224	14,74	12	225	14,43
	13	164	23,21	13	165	23,27		13	225	14,43	13	226	14,11
	14	165	23,27	14	166	23,31		14	226	14,11	14	227	13,78
	15	166	23,31	15	167	23,35		15	227	13,78	15	228	13,45
	16	167	23,35	16	168	23,39		16	228	13,45	16	229	13,12
	17	168	23,39	17	169	23,41		17	229	13,12	17	230	12,79
	18	169	23,41	18	170	23,43		18	230	12,79	18	231	12,45
	19	170	23,43	19	171	23,44		19	231	12,45	19	232	12,10
	20	171	23,44	20	172	23,45		20	232	12,10	20	233	11,75
	21	172	23,45	21	173	23,45		21	233	11,75	21	234	11,40
	22	173	23,45	22	174	23,44		22	234	11,40	22	235	11,05
	23	174	23,44	23	175	23,42		23	235	11,05	23	236	10,69
	24	175	23,42	24	176	23,40		24	236	10,69	24	237	10,33
	25	176	23,40	25	177	23,37		25	237	10,33	25	238	9,97
	26	177	23,37	26	178	23,34		26	238	9,97	26	239	9,60
	27	178	23,34	27	179	23,29		27	239	9,60	27	240	9,23
	28	179	23,29	28	180	23,24		28	240	9,23	28	241	8,86
	29	180	23,24	29	181	23,18		29	241	8,86	29	242	8,48
	30	181	23,18	30	182	23,12		30	242	8,48	30	243	8,10
								31	243	8,10	31	244	7,72
Média			23,08					13,30					12,97
Média de Junho			23,10				Média de Agosto			13,13			
Julho	1	182	23,12	1	183	23,05	Setembro	1	244	7,72	1	245	7,34
	2	183	23,05	2	184	22,97		2	245	7,34	2	246	6,96
	3	184	22,97	3	185	22,89		3	246	6,96	3	247	6,57
	4	185	22,89	4	186	22,80		4	247	6,57	4	248	6,18
	5	186	22,80	5	187	22,70		5	248	6,18	5	249	5,79
	6	187	22,70	6	188	22,59		6	249	5,79	6	250	5,40
						7	250	5,40	7	251	5,01		
						8	251	5,01	8	252	4,61		

	9	252	4,61	9	253	4,22		9	313	-17,65	9	314	-17,91
	10	253	4,22	10	254	3,82		10	314	-17,91	10	315	-18,17
	11	254	3,82	11	255	3,42		11	315	-18,17	11	316	-18,42
	12	255	3,42	12	256	3,02		12	316	-18,42	12	317	-18,67
	13	256	3,02	13	257	2,62		13	317	-18,67	13	318	-18,91
	14	257	2,62	14	258	2,22		14	318	-18,91	14	319	-19,15
	15	258	2,22	15	259	1,81		15	319	-19,15	15	320	-19,38
	16	259	1,81	16	260	1,41		16	320	-19,38	16	321	-19,60
	17	260	1,41	17	261	1,01		17	321	-19,60	17	322	-19,82
	18	261	1,01	18	262	0,60		18	322	-19,82	18	323	-20,03
	19	262	0,60	19	263	0,20		19	323	-20,03	19	324	-20,24
	20	263	0,20	20	264	-0,20		20	324	-20,24	20	325	-20,44
	21	264	-0,20	21	265	-0,61		21	325	-20,44	21	326	-20,64
	22	265	-0,61	22	266	-1,01		22	326	-20,64	22	327	-20,83
	23	266	-1,01	23	267	-1,41		23	327	-20,83	23	328	-21,01
	24	267	-1,41	24	268	-1,82		24	328	-21,01	24	329	-21,18
	25	268	-1,82	25	269	-2,22		25	329	-21,18	25	330	-21,35
	26	269	-2,22	26	270	-2,62		26	330	-21,35	26	331	-21,52
	27	270	-2,62	27	271	-3,02		27	331	-21,52	27	332	-21,67
	28	271	-3,02	28	272	-3,42		28	332	-21,67	28	333	-21,83
	29	272	-3,42	29	273	-3,82		29	333	-21,83	29	334	-21,97
	30	273	-3,82	30	274	-4,22		30	334	-21,97	30	335	-22,11
Média			1,99			1,60		Média		-19,05			-19,28
Média de Setembro				1,79			Média de Novembro				-19,16		
Outubro	1	274	-4,22	1	275	-4,61	Dezembro	1	335	-22,11	1	336	-22,24
	2	275	-4,61	2	276	-5,01		2	336	-22,24	2	337	-22,36
	3	276	-5,01	3	277	-5,40		3	337	-22,36	3	338	-22,48
	4	277	-5,40	4	278	-5,79		4	338	-22,48	4	339	-22,59
	5	278	-5,79	5	279	-6,18		5	339	-22,59	5	340	-22,70
	6	279	-6,18	6	280	-6,57		6	340	-22,70	6	341	-22,80
	7	280	-6,57	7	281	-6,96		7	341	-22,80	7	342	-22,89
	8	281	-6,96	8	282	-7,34		8	342	-22,89	8	343	-22,97
	9	282	-7,34	9	283	-7,73		9	343	-22,97	9	344	-23,05
	10	283	-7,73	10	284	-8,11		10	344	-23,05	10	345	-23,12
	11	284	-8,11	11	285	-8,48		11	345	-23,12	11	346	-23,18
	12	285	-8,48	12	286	-8,86		12	346	-23,18	12	347	-23,24
	13	286	-8,86	13	287	-9,23		13	347	-23,24	13	348	-23,29
	14	287	-9,23	14	288	-9,60		14	348	-23,29	14	349	-23,34
	15	288	-9,60	15	289	-9,97		15	349	-23,34	15	350	-23,37
	16	289	-9,97	16	290	-10,33		16	350	-23,37	16	351	-23,40
	17	290	-10,33	17	291	-10,69		17	351	-23,40	17	352	-23,42
	18	291	-10,69	18	292	-11,05		18	352	-23,42	18	353	-23,44
	19	292	-11,05	19	293	-11,40		19	353	-23,44	19	354	-23,45
	20	293	-11,40	20	294	-11,75		20	354	-23,45	20	355	-23,45
	21	294	-11,75	21	295	-12,10		21	355	-23,45	21	356	-23,44
22	295	-12,10	22	296	-12,45	22	356	-23,44	22	357	-23,43		
23	296	-12,45	23	297	-12,79	23	357	-23,43	23	358	-23,41		
24	297	-12,79	24	298	-13,12	24	358	-23,41	24	359	-23,39		
25	298	-13,12	25	299	-13,46	25	359	-23,39	25	360	-23,35		
26	299	-13,46	26	300	-13,78	26	360	-23,35	26	361	-23,31		
27	300	-13,78	27	301	-14,11	27	361	-23,31	27	362	-23,27		
28	301	-14,11	28	302	-14,43	28	362	-23,27	28	363	-23,21		
29	302	-14,43	29	303	-14,74	29	363	-23,21	29	364	-23,15		
30	303	-14,74	30	304	-15,06	30	364	-23,15	30	365	-23,09		
31	304	-15,06	31	305	-15,36	31	365	-23,09	31	366	-23,01		
Média			-9,85			-10,21	Média		-23,10				-23,12
Média de Outubro				-10,03			Média de Dezembro				-23,11		
Novembro	1	305	-15,36	1	306	-15,67							
	2	306	-15,67	2	307	-15,96							
	3	307	-15,96	3	308	-16,26							
	4	308	-16,26	4	309	-16,55							
	5	309	-16,55	5	310	-16,83							
	6	310	-16,83	6	311	-17,11							
	7	311	-17,11	7	312	-17,38							
	8	312	-17,38	8	313	-17,65							