



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Concentrador solar para dessalinização de água: projeto e construção

Gustavo Otero Prado
Uberlândia
2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Concentrador solar para dessalinização de água: projeto e construção

Gustavo Otero Prado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia-MG
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

P896c Prado, Gustavo Otero, 1983-
Concentrador solar para dessalinização de água : projeto e construção /
Gustavo Otero Prado. - 2011.
98 f. : il.

Orientadores: João Jorge Ribeiro Damasceno e Luiz Gustavo Martins
Vieira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

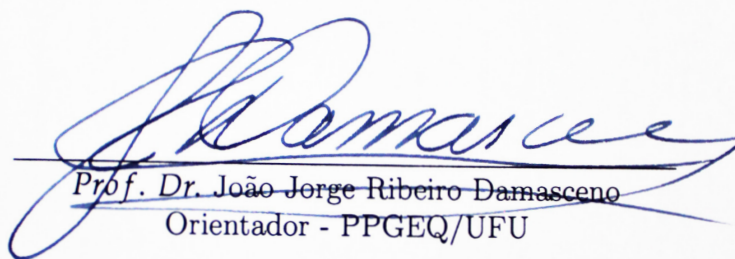
1. Engenharia Química - Teses. 2. Energia solar - Teses. I. Damasceno,
João Jorge Ribeiro. II. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976- III. Universi-
dade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. IV. Título.

CDU: 66.0

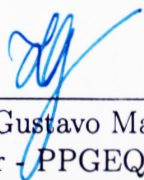
Concentrador solar para dessalinização de água: projeto e construção

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Química em 03 de Agosto de 2011.


BANCA EXAMINADORA



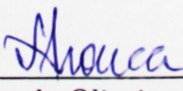
Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador - PPGEQ/UFU



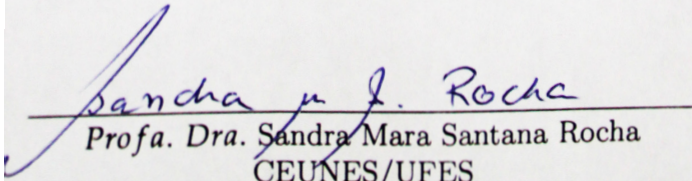
Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador - PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca
FEQUI/UFU



Profa. Dra. Sandra Mara Santana Rocha
CEUNES/UFES

Agradecimentos

À Deus, pela força e pela permissão de dar continuidade aos meus estudos.

Ao mestre Jesus, à Maria, ao Chico Xavier e ao Sai Baba pelos exemplos de humildade e de trabalho.

À Ermance Dufaux, ao André Luiz, Ângelo Inácio, Dr. Bezerra de Menezes, Emmanuel, Inácio Ferreira, Pai João de Aruanda, José Carlos, Dr. José Lacerda e Ramatís pela paciência, pelo conforto e pelo auxílio.

Aos meus pais, Jerson e Zélia, pela encarnação, pela educação e pelos pensamentos positivos.

Aos meus irmãos, Rildo e Filipe, pelo apoio e cumplicidade.

À Liliane, pelo reencontro, resgate e aprendizado.

Aos amigos do Instituto Seva, do União e Amor, da Casa Pai Benedito e ao grupo de estudos Odilon Fernandes.

Aos Professores João Jorge Ribeiro Damasceno e Luiz Gustavo Martins Vieira, pela orientação deste trabalho e pela confiança.

Aos meus amigos e companheiros de curso pela força e união.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca e Profa. Dra. Sandra Mara Santana Rocha, pelo enriquecimento deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

*“Lembra-te sempre: Cada dia nasce de novo
amanhecer.”
(Chico Xavier)*

À minha família de todas as dimensões.

Resumo

A energia é a força motriz das transformações da natureza. O instinto humano é programado para buscar fontes energéticas visando sua sobrevivência e seu conforto, porém o uso indiscriminado e ambicioso dessa energia desarmoniza o equilíbrio natural promovendo um meio ambiente cada vez mais inóspito e uma saturação de recursos naturais comprometendo, inclusive, a disponibilidade de água potável no planeta. As fontes energéticas como o petróleo, o carvão e a fissão nuclear não são renováveis e continuamente produzem resíduos geradores de poluição. Como alternativa têm-se fontes energéticas renováveis como as das ondas e das marés, a geotérmica e a eólica. Nenhuma, porém, é tão abundante e disponível quanto a energia solar. Quanto a escassez de água, hoje, segundo Wambeke (2007), mais de 1,1 bilhão de pessoas não tem a quantidade mínima de água para sobreviver. Este trabalho teve como inspiração a utilização da energia solar para potabilizar água salobra. Para isso foi planejado e construído um concentrador solar de calha parabólica e uma unidade de evaporação para ser acoplada ao concentrador. Os valores utilizados para a dimensionalização foram baseados nas condições meteorológicas locais e com o objetivo de se atingir temperatura superiores a 100°C no fluido dentro da tubulação. Para a definição dimensional da calha foi visto que uma curvatura com formato parabólico conseguiu concentrar o foco sem dispersão, que seriam necessários uma área de abertura de calha com 20 m^2 e uma tubulação com 43 m para se atingir a temperatura de projeto. Percebeu-se que o vento é o maior responsável pela perda de calor por convecção e que para menores vazões atinge-se a temperatura de equilíbrio do sistema com um comprimento de tubulação menor. Fez-se, ainda, uma caracterização preliminar do sistema de aquecimento com o intuito de se observar as temperaturas máximas atingidas. Pôde-se observar que a temperatura máxima foi de 105°C utilizando a vazão via termossifão.

Palavras-chave: *energia solar, concentrador solar, dessalinizador solar, calha parabólica, água salobra, evaporador, termossifão.*

Abstract

Energy is the driving force of the transformations of nature. The human instinct is scheduled to search for energy sources in order to their survival and comfort but the indiscriminate and ambitious use disrupts the natural balance resulting in an environment increasingly inhospitable and a saturation of natural resources compromising even the availability of drinking water on the planet. Energy sources like oil, coal and nuclear fission are not renewable and constantly produce polluting residues. Alternatively to have renewable energy sources such as wave and tidal, geothermal and wind power. None, however, is so abundant and available as solar energy. Regarding the shortage of water today, according to Wambeke (2007), more than 1.1 billion people do not have the minimum amount of water to survive. This work was inspired by the use of solar energy for turn salt water into potable water. To this was planned and built a parabolic trough solar concentrator and an evaporation plant to be connected to the solar concentrator. The values used to build the project were based on local weather conditions and with the goal of reaching temperatures higher than 100 °C in the fluid inside the pipe. For the definition of dimensional trough was seen that a parabolic curve succeeded in shifting the focus without scattering, that would take a trough area with 20 m^2 and a pipe with 43 m to reach the design temperature. It was noticed that the wind is largely responsible for the loss of heat by convection and that for smaller flow reaches the temperature equilibrium of the system with a smaller length of pipe. There was also a preliminary characterization of the heating system in order to observe the maximum temperatures reached. It might be noted that the maximum temperature was 105 °C by using the flow through the thermosiphon.

Keywords: *solar energy, solar concentrator, solar desalination, parabolic trough, brackish water, evaporator, thermosiphon.*

LISTA DE FIGURAS

2.1	Ângulos de estudo do coletor solar	8
2.2	Diagrama do caminho do sol	11
2.3	Ângulo de incidência da radiação na superfície plana e inclinada	11
2.4	Descrição ilustrativa dos comprimentos de onda	13
2.5	Correlações de I_d/I	16
2.6	Correlação sugerida por Erbs	17
2.7	Vetor da reflexão	20
2.8	Estágios da trajetória da luz para reflexão	21
2.9	Imagem de incidência para um espelho parabolóide	22
2.10	Coleta de raios do espelho côncavo	22
2.11	Definição numérica de abertura	23
2.12	Figura esquemática da câmera de Schmidt	23
2.13	Configurações de coletores solares	24
2.14	Torre Solar de San Francisco, Califórnia, USA	25
2.15	Correlação entre o sole e a terra	26
2.16	Concentrador solar cilíndrico	26
2.17	Seção transversal do concentrador linear parabólico	27
2.18	Seção transversal dimensionada	27
2.19	Relação do ângulo ϕ_r	28

2.20	Correções para um refletor imperfeito (arco de 75 graus)	29
2.21	Ângulo de dispersão para medição de erros angulares	29
2.22	Distribuição de fluxo em um concentrador solar cilíndrico	30
2.23	Fluxo energético no evaporador solar simples	31
2.24	Corte transversal de um evaporador solar	32
2.25	Corte transversal de um evaporador solar	33
2.26	Evaporador solar de múltiplo efeito com três estágios	34
2.27	Evaporador solar de mecha	34
2.28	Evaporador solar com sistema de vácuo	35
2.29	Evaporador solar com borrifamento	35
3.1	Procedimentos para encontrar o foco de uma curvatura	39
3.2	Balço de energia em tubulação cilíndrica	40
3.3	Área de abertura da curvatura	43
3.4	Distribuição dos termômetros no sistema para captação dos dados	44
3.5	Vista explodida do coletor solar	45
3.6	Vista explodida do evaporador	46
4.1	Curvatura parabólica e distância focal	48
4.2	Corte parabólico da calha e localização espacial do foco	49
4.3	Curvatura circunferencial e distância focal (F)	49
4.4	Corte circunferencial da calha e localização espacial do foco	50
4.5	Curvatura exponencial e distância focal (F)	51
4.6	Curvatura exponencial da calha e localização espacial do foco	51
4.7	Temperatura de equilíbrio do fluido em função da radiação	52
4.8	Comprimento de tubulação necessário para se alcançar uma temperatura de 100°C	52
4.9	Temperatura do fluido em função do comprimento da tubulação	53
4.10	Representação do caminho do Sol para o sentido Leste-Oeste	54
4.11	Representação do caminho do Sol para o sentido Norte-Sul	54

4.12	Coeficiente de película em face da velocidade dos ventos atmosféricos e de temperaturas ambiente	55
4.13	Coletor solar de calha parabólica montado	56
4.14	Fotografia da vista frontal do coletor solar	56
4.15	Fluxograma do coletor solar com 1 passe	57
4.16	Fluxograma do coletor solar com 2 passes	57
4.17	Vista do evaporador montado	58
4.18	Fotografia dos vasos do evaporador	58
4.19	Fluxograma do evaporador	59
4.20	Dados experimentais e meteorológicos a uma vazão de 20 L/h	60
4.21	Medições de radiação (R) e de temperatura ambiente de Uberlândia(T_{∞})	61
4.22	Temperatura na saída do tubo receptor (20L/h)	61
4.23	Temperatura na entrada do tubo receptor (20 L/h)	62
4.24	Dados experimentais e meteorológicos a uma vazão de 10 L/h	62
4.25	Radiação (R) e de temperatura ambiente de Uberlândia(T_{∞})	63
4.26	Temperatura na saída do tubo receptor (10L/h)	63
4.27	Temperatura na entrada do tubo receptor (10 L/h)	64
4.28	Dados experimentais e meteorológicos a uma vazão de 5L/h	64
4.29	Radiação (R) e temperatura ambiente de Uberlândia(T_{∞})	65
4.30	Temperatura na saída do tubo receptor (5 L/h)	65
4.31	Temperatura na entrada do tubo receptor(5 L/h)	66
4.32	Dados experimentais e meteorológicos a uma vazão de 40L/h	66
4.33	Dados experimentais e meteorológicos a uma vazão termossifonada	67
A.1	Calibração dos termômetros	75
A.2	Calibração da bomba peristáltica	76
B.1	Desenho simplificado do apoio da calha	78
B.2	Desenho simplificado da estrutura da calha	79
B.3	Desenho simplificado do evaporador	80

B.4 Fotografia do coletor solar acoplado ao evaporador 81

LISTA DE TABELAS

2.1	Dia médio do mês e valores de n	9
2.2	Refletividade de diferentes tipos de superfícies	18
3.1	Coefficientes da correlação de Zukauskas (1972)	42
D.1	Dados Meteorológicos do INMET	91

SIMBOLOGIA

a - abertura da calha [m]

A_a - área de abertura da calha do concentrador [m^2]

A_r - área do receptor [m^2]

A_c - área da calha refletora [m^2]

c - velocidade da luz [$m.s^{-1}$]

C - índice de concentração

C_1 - constante resultante da linearização dos dados da tabela de vapor, [$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]

C - índice de concentração [-]

C_{max} - índice de área de concentração máximo [-]

D - diâmetro externo da tubulação [m]

E - equação de correlação do tempo solar

E_r - energia radiante [$W.m^{-2}$]

f - comprimento focal [m]

G_{SC} - contante solar [$W.m^{-2}$]

h - coef. convectivo de transf. de calor para região externa ao tubo [$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]

H - entalpia [J]

i - dia específico do mês

I - ângulo de incidência de um feixe [-]

k_T - índice de claridade horário atmosférico [-]

K_T - O índice de claridade diário [-]

k_p - constante de Planck [$J.s$]

L_{loc} - longitude do observador em graus oeste [-]

L_{st} - longitude do meridiano padrão [-]

L_{total} - comprimento da tubulação necessários para se atingir a temperatura máxima
[m]

L_{tubo} - comprimento do tubo [m]

m - massa de ar [kg], coeficiente angular de reta

\dot{m} - vazão mássica [$kg.s^{-1}$]

n - número do dia do ano, índice de refração [-]

q_{conv} - energia transferida por convecção externa [$W.m^{-2}$]

q_e - radiação emitida pela tubulação [$W.m^{-2}$]

q_r - radiação média registrada pelo INMET [$W.m^{-2}$]

q_{ri} - radiação que chega à tubulação por reflexão [$W.m^{-2}$]

Q - vazão volumétrica [$L.h^{-1}$]

r - raio do sol [m]

R - distância do sol [m], intensidade de luz por transmissividade [cd], razão entre a radiação total em uma superfície inclinada e a radiação na superfície horizontal [-]

R_b - razão entre a radiação direta horária na superfície inclinada e a radiação direta horária no plano horizontal [-]

r_p - amplitude de reflexão paralela [-]

r_s - amplitude de reflexão perpendicular [-]

R_p - intensidade de luz por reflectância paralela [-]

R_s - intensidade de luz por reflectância perpendicular [-]

S - radiação absorvida [$W.m^{-2}$]

T - temperatura do fluido em cada posição axial [$^{\circ}C$]

T_p - tempo padrão [h]

T_s - tempo solar [h]

t_p - amplitude de transmissão paralela [-]

t_s - amplitude de transmissão perpendicular [-]

- T_p - intensidade de luz por transmitância paralela [-]
 T_s - intensidade de luz por transmitância perpendicular [-]
 T_∞ - temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$]
 t_{max} - tempo para atingir a temperatura máxima [s]
 ν - frequência da radiação [s^{-1}]
 V_R - coeficiente de correlação linear [-]
 w - distância do centro até a área focal [m]
 W - comprimento do receptor plano [m]
 z - posição axial [m]

Nomenclatura da Radiação

- G - irradiância [W.m^{-2}]
 H - radiação solar total medida em um dia [J.m^{-2}]
 I - radiação solar total horária, irradição ou exposição radiante [J.m^{-2}]

subscritos

- b - direto
 d - difuso
 n - normal
 T - no plano inclinado
 θ - extraterrestre

Letras gregas

- α - absorvância para a incidência da radiação solar no receptor
 β - inclinação do coletor solar
 δ - declinação solar, ângulo de dispersão que mede os erros angulares
 ϵ_0 - permissividade elétrica ou constante dielétrica
 ϵ - permissividade do meio
 γ - azimute de superfície, fator de intercepção óptico

γ_s - azimute solar

γ_0 - comprimento de onda

θ - ângulo de incidência

θ_{max} - ângulo de incidência máximo

θ_Z - ângulo zenital

θ_s - metade do ângulo subtendido entre o sol e a terra

φ_s - ângulo da altura solar

ϕ - latitude

ϕ_r - ângulo de borda

ρ - refletividade do solo, reflectância do refletor

σ - constante de Stefan-Boltzmann

τ - transmitância da superfície

μ_0 - permeabilidade magnética

μ - permeabilidade relativa do meio

ω - ângulo horário

ω_s - ângulo horário do pôr do sol e do nascer do sol

SUMÁRIO

Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Simbologia	xxi
1 Introdução	1
1.1 Justificativas	1
1.2 Objetivos	2
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Terminologia	5
2.2 Considerações Geométricas	7
2.2.1 Solstícios	7
2.2.2 Equinócios	8
2.2.3 Órbita Terrestre	8
2.2.4 Relações Angulares	9
2.2.5 Esfera Celeste	10

2.3	Radiação Extraterreste	12
2.3.1	Energia Radiante	12
2.3.2	Constante Solar	14
2.3.3	Índice de Claridade horário e diário	14
2.3.4	Radiação extraterreste na superfície horizontal	15
2.3.5	Radiação extraterreste na superfície Inclinação	16
2.4	Concentrador Solar	18
2.4.1	Conceitos de Óptica	18
2.4.2	A Trajetória da Luz	20
2.4.3	Imagem formada por espelhos	21
2.4.4	Configuração do Coletor	24
2.4.5	Índice de Concentração	25
2.4.6	Coletor Cilíndrico ou Linear	26
2.5	Evaporador Solar	31
2.5.1	Mecanismo	31
2.5.2	Histórico	31
2.5.3	Modelos	32
3	Materiais e Métodos	37
3.1	Localização Geográfica	37
3.2	Construção da Unidade	37
3.2.1	Definição da Curvatura da Calha	38
3.2.2	Balanco de Energia	38
3.2.3	Cálculo da radiação que chega a tubulação (q_{ri})	43
3.3	Orientação do coletor	44
3.4	Dados Experimentais	44
3.4.1	Sistema de Aquecimento	44
3.5	Materiais	45
3.5.1	Sistema de Aquecimento	45

3.5.2	Evaporador	46
4	Resultados e Discussões	47
4.1	Construção da Unidade	47
4.1.1	Definição da Curvatura da Calha	47
4.1.2	Cálculo da área de abertura da calha	51
4.1.3	Orientação cardeal	53
4.1.4	Influência do coeficiente de transferência de calor	54
4.1.5	Protótipo	55
4.1.6	Coletor Solar	55
4.1.7	Evaporador	58
4.2	Dados Experimentais	59
4.2.1	Coletor Solar	59
5	Conclusões e Sugestões	69
	Referências Bibliográficas	71
A	Calibração	75
A.1	Calibração dos termômetros	75
A.2	Calibração da bomba peristáltica	76
B	Desenhos e Fotografias do Projeto	77
B.1	Concentrador Solar	77
B.2	Evaporador	77
C	Algoritmos Implementados	83
C.1	Temperatura Máxima X Comprimento da Tubulação Receptora	83
C.2	Coeficiente de Película	85
C.3	Comprimento da Tubulação Receptora X Radiação Incidida	87
C.4	Temperatura Máxima X Radiação Incidida	88

D Dados Meteorológicos

91

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Justificativas

Só há uma necessidade humana imprescindível: a energia (PALZ, 2002). Todas as ações, todas as atitudes, todos os reflexos da humanidade e de todas as coisas são voltadas para a aquisição, o confinamento, e a utilização da energia. Os humanos e os animais buscam incessantemente alimentos para suprir sua energia química que é responsável pelas funções vitais. Os casulos, as tocas, as casas são isolantes térmicos que evitam a dissipação da energia adquirida. A movimentação, o pensamento, a fala são formas e formatos do sentido implícito da existência: a energia. Contudo, a busca desordenada e insaciável abala o equilíbrio natural levando a consequências catastróficas como a poluição atmosférica e a escassez de água.

A busca por energia é um dos fundamentos que motiva a evolução. Na tentativa de suprir essa necessidade são conhecidos diversos métodos de aquisição energética como as queimas de combustíveis químicos e nucleares que têm como desvantagens o seu esgotamento e a poluição residual. A energia eólica, a energia das ondas e das marés são fontes alternativas bem quistas exatamente por não produzirem resíduos e serem renováveis. Porém, nenhuma é tão poderosa e abundante quanto a energia solar.

“O Sol a serviço da humanidade” foi o tema central do Congresso Internacional promovido pela UNESCO em 1973 que já elaborava estratégias preventivas para um possível racionamento energético isso porque a energia solar é considerada:

- Inesgotável, o tempo útil de vida do sol se estende a bilhões de anos;
- Limpa, não gera resíduos;
- Adaptável, pode ser captada em ambientes inóspitos como os desertos;
- Lucrativa, como o carbono virou uma moeda financeira, a utilização de uma energia sem resíduos desse material gera créditos para a economia.

O Brasil possui grande parte do território com níveis altos de insolação sendo, portanto, um potencial de mercado.

Outro desafio a ser considerado é o da escassez de água. Isso porque do total de água disponível no planeta 97,5 % são de águas salgadas ou salobras, restando 2,5 % de água doce em que: 70 % são de geleiras, 29 % são de aquíferos e apenas 1 %, ou seja, 0,025 % do total das águas são de rios e lagos. Segundo Wambeke (2007), responsável pelo departamento de recursos hídricos da Agência das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), em 2025 dois terços da população sofrerá com a falta de água.

Ainda segundo Wambeke (2007), hoje, mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo já não têm acesso à água limpa para suprir as necessidades básicas e mais de 2,5 bilhões não têm saneamento básico adequado.

Neste cenário, a obtenção de água potável pelo processamento de águas salobras ou de águas marítimas é necessário. Muitas técnicas são possíveis para esse tratamento conforme citado por Daniels (1978) que incluem a evaporação através da energia solar ou através de combustíveis fósseis, evaporadores simples e múltiplos, compressores a vapor, centrífugas, trocas iônicas, osmose inversa, tratamentos eletroquímicos, eletrodialises, extração por solventes e outras.

Visando às regiões com poucos recursos hídricos e de difícil acesso, o estudo desse trabalho voltar-se-á para o planejamento e a construção de um concentrador solar e de uma unidade acoplada para produção de água pura a partir de águas salobras. Segue a linha iniciada por Siqueira (2009) e por Arouca (2010) que estudaram coletores solares planos no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEQ-UFU)

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos gerais dar continuidade aos estudos com energia solar no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de

Uberlândia (PPGEQ-UFU).

Em se tratando de objetivos específicos, este trabalho visou a:

1. propor as principais dimensões geométricas e definir as condições operacionais de um concentrador solar de calha parabólica;
2. construir, a partir da etapa 1, um protótipo de concentrador solar (calha parabólica) para ser devidamente instalado nas dependências da Unidade Avançada de Pesquisa de Engenharia Química (UAPEQ), visando o desenvolvimento de futuros trabalhos;
3. propor um evaporador para a produção de água potável a partir de água salobra, utilizando como fonte quente a energia captada pela unidade concebida no item 2;
4. construir, a partir da etapa 3, um protótipo de evaporador para ser futuramente acoplado ao concentrador solar;
5. realizar a caracterização preliminar do desempenho do concentrador solar, a fim de que em trabalhos futuros ele possa ser devidamente acoplado ao evaporador para produção de água potável a partir de água salobra.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo é voltado para a revisão bibliográfica pertinente ao estudo da energia solar e dos equipamentos de captação. Faz uma abordagem da geometria angular do sol, da radiação solar, dos concentradores e dos evaporadores solares.

2.1 Terminologia

Para entender o comportamento da radiação solar na terra faz-se necessário o conhecimento das seguintes definições, citado por Duffie e Beckman (1980).

- Zênite: Linha imaginária que liga o centro da terra a um ponto na superfície, prolongando-se até o espaço acima do observador.
- Massa de Ar (m): É a relação entre a espessura óptica da atmosfera que a radiação passa, com a espessura óptica caso o sol estivesse no zênite. A massa de ar quantifica a redução do poder da luz que passa através da atmosfera e é absorvido pelo ar, poluição, etc.
- Radiação Direta ou de Feixe (I_b): Radiação vinda do sol que não foi dispersada pela atmosfera.
- Radiação Difusa (I_d): Radiação vinda do sol que sofre dispersão pela atmosfera.

- Radiação Total: A soma entre a radiação direta e a difusa em uma superfície horizontal ou inclinada.
- Irradiância: Fluxo de energia eletromagnética incidente em uma superfície (W/m^2), representado por G .
- Irradiação ou Exposição Radiante: Fluxo de energia eletromagnética incidente em um determinado período de tempo (J/m^2). Pode ser expressa por I se utilizar o tempo de medição de uma hora ou H para a insolação de um dia (ou outro tempo especificado).
- Radiosidade: Fluxo de energia radiante que deixa uma superfície (W/m^2). Combina emissão, reflexão e transmissão.
- Emissividade: Representa a fração de energia incidente que é emitida ou absorvida (W/m^2).
- Tempo Solar: É o tempo baseado no movimento angular aparente do sol através do céu, sendo o meio-dia solar o tempo em que o sol cruza o meridiano do observador. Não coincide com o horário padrão mas pode ser convertido corrigindo duas variáveis. A primeira é a diferença de longitude entre a localização do meridiano do observador e o meridiano padrão do horário baseado. A outra correção vem da Equação do Tempo, Equação (2.2), que considera as perturbações na taxa de rotação da terra (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

$$Ts = Tp + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.1)$$

$$E = 9,87\sin 2B - 7,53\cos B - 1,5\sin B \quad (2.2)$$

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (2.3)$$

Tal que:

n = Número do dia do ano, $1 \leq n \leq 365$.

L_{st} = Longitude do meridiano padrão para o horário local da área.

L_{loc} = Longitude do observador em graus oeste.

Ts = Tempo solar.

Tp = Tempo padrão.

2.2 Considerações Geométricas

O estudo apropriado da posição do Sol em relação a um determinado local da terra, exige um sistema referencial para o observador. A posição é definida em termos de latitude, longitude e altitude, no formato de coordenadas esféricas (LUIZ, 1985).

Seguem as definições geométricas para os estudos solares:

- Ângulo da Altura Solar (φ_s): Ângulo formado entre os raios solares e sua projeção no plano horizontal.
- Ângulo de Incidência (θ): Ângulo entre a normal à superfície inclinada e a radiação direta.
- Ângulo Horário (ω): Deslocamento angular do sol para leste ou oeste do meridiano local, que devido à rotação da terra no seu eixo é 15° por hora. De manhã é negativo e à tarde é positivo.
- Ângulo Zenital (θ_z): Ângulo formado entre o zênite e os raios solares. Variável conforme a latitude, horário e época do ano.
- Azimute de Superfície (γ): É o desvio da projeção em um plano horizontal da normal à superfície do meridiano local. Para o hemisfério Sul, o norte é igual a zero, o leste é positivo e o oeste é negativo. Já para o hemisfério norte, o sul é igual a zero, o leste é negativo e o oeste positivo ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- Azimute Solar (γ_s): Para o hemisfério sul, é o ângulo compreendido da direção norte até a linha de projeção da radiação direta no plano horizontal.
- Declinação solar (δ): Ângulo entre os raios da luz solar e o plano do equador.
- Inclinação do coletor solar (β): Ângulo entre a horizontal e o plano da superfície ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).
- Latitude(ϕ): Localização angular que varia para norte (positivo) ou sul (negativo) do equador ($-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$).

Estas definições são ilustradas na Figura 2.1.

2.2.1 Solstícios

Quando a projeção do eixo da terra sobre o plano da órbita terrestre elíptica coincide com a linha que liga os centros da terra e do sol, o ângulo entre os raios do Sol e o

plano do equador é máximo, atingindo $23^{\circ} 45'$ (DUFFIE; BECKMAN, 1980). Esta situação ocorre duas vezes por ano nos dias solsticiais. Logo a declinação é $+ 23^{\circ} 45'$ no solstício de Junho (Inverno do hemisfério sul) e $- 23^{\circ} 45'$ no solstício de Dezembro (Verão do hemisfério sul). Nesses dias o Sol estará, respectivamente, sobre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio.

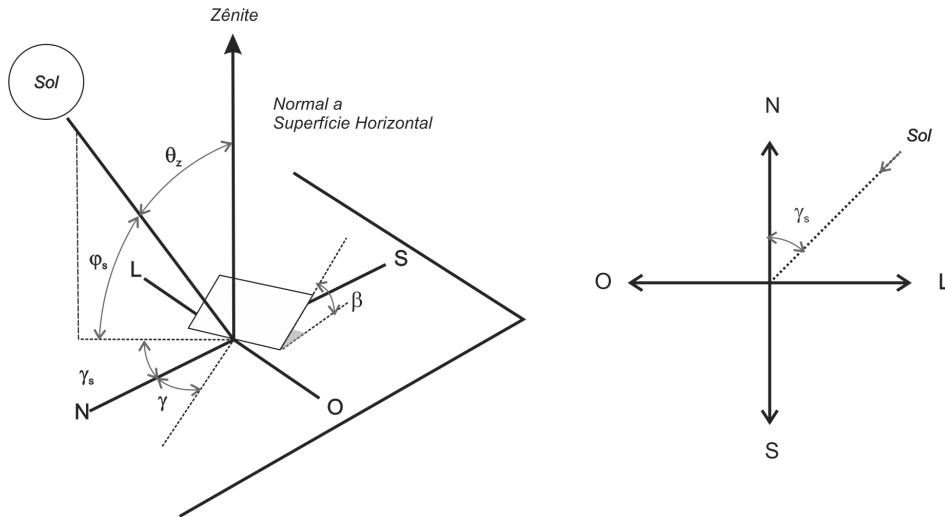


Figura 2.1: Ângulos de estudo do coletor solar, adaptado de Duffie e Beckman (1980).

2.2.2 Equinócios

Quando a projeção do eixo da terra sobre o plano da órbita terrestre é perpendicular à linha que une os centros da terra e do sol, o ângulo entre os raios solares e plano do equador terrestre é nulo. Situação que ocorre nos equinócios, em Março e Setembro, quando o Sol parece passar de um hemisfério para o outro. Nos dias equinociais a declinação do Sol é 0° , atingindo o zênite sobre a linha do equador.

2.2.3 Órbita Terrestre

Como a excentricidade da órbita da terra é muito pequena, ela pode ser aproximada a um círculo e seu cálculo, para qualquer dia do ano e com ângulos medidos em graus, é dado pela Equação (2.4) elaborada por Cooper (1969).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.4)$$

Em que n é o dia do ano, obtido convenientemente pela Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Dia médio do mês e valores de n , adaptado de Klein (1977).

Mês	Dia Específico do Mês(i)	Data	n(dia do ano)	Declinação (δ)
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	31+i	16	47	-13
Março	59+i	16	75	-2,4
Abril	90+i	15	105	9,4
Mai	120+i	15	135	18,8
Junho	151+i	11	162	23,1
Julho	181+i	17	198	21,2
Agosto	212+i	16	228	13,5
Setembro	243+i	15	258	2,2
Outubro	273+i	15	288	-9,6
Novembro	304+i	14	318	-18,9
Dezembro	334+i	10	344	-23

2.2.4 Relações Angulares

A Equação (2.5) relaciona o ângulo de incidência da radiação direta, θ , e outros ângulos:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.5)$$

Para superfícies fixas inclinadas direcionadas para o sul ou para o norte, o ângulo azimutal da superfície inclinada γ é igual a 0° ou 180° , o que anula o último termo. No caso de superfícies verticais ($\beta = 90^\circ$), a Equação (2.5) torna-se:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.6)$$

Já para superfícies horizontais $\beta=0^\circ$, o ângulo de incidência é um ângulo zênite solar ($\theta = \theta_z$) transformando a Equação (2.5) em:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (2.7)$$

Alguns coletores se movem acompanhando a direção dos raios solares. Os movimentos podem ser modelados utilizando um eixo (sentido leste-oeste, norte-sul ou paralelo ao eixo

terrestre) ou dois eixos. Segundo Eibling, Thomas e Landry (1953) as seguintes equações são utilizadas para:

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal leste-oeste, com um único ajuste ao meio dia solar:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos \omega \quad (2.8)$$

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal leste-oeste, com ajuste contínuo:

$$\cos \theta = \left(1 - \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal norte-sul, com ajuste contínuo:

$$\cos \theta = \left[(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)^2 + \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

- Um plano móvel a partir de um eixo norte-sul com sentido paralelo ao eixo terrestre e ajustes contínuos:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (2.11)$$

- Um plano com eixo duplo orientado continuamente para a face do sol:

$$\cos \theta = 1 \quad (2.12)$$

2.2.5 Esfera Celeste

A esfera celeste é uma esfera imaginária com raio indefinido e centro na terra, representa a posição dos astros. O sol viaja pela esfera celeste aproximadamente de leste para oeste deixando um rastro chamado de *caminho do sol* que varia conforme a hora, o dia do ano e a latitude (KREIDER; KREITH, 1981). Sua representação gráfica pode ser simulada conforme demonstra a Figura 2.2.

A duração em horas da luz solar, para um determinado dia do ano, pode ser calculado pela Equação (2.13). Já a hora do pôr-do-sol, ou seja quando $\theta_z=90^\circ$, em ângulo hora, é calculada pela Equação (2.14).

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.13)$$

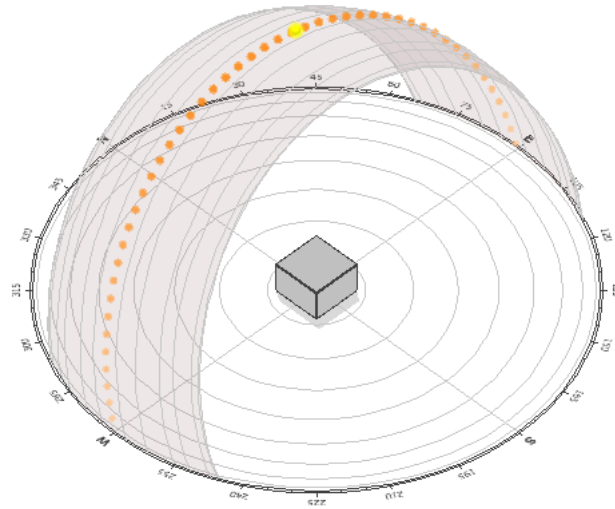


Figura 2.2: Diagrama do caminho do sol, adaptado de Marsh (2011).

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \phi \tan \delta \quad (2.14)$$

Frequentemente faz-se necessário o cálculo da radiação horária sobre uma superfície inclinada de um coletor usando medições ou estimativas de radiação solar na superfície horizontal. Para isso utiliza-se o fator geométrico, R_b , que é a razão da radiação na superfície inclinada com a radiação na superfície horizontal, em qualquer instante. A Figura 2.3 ilustra o ângulo de incidência da radiação normal para superfície inclinada e plana.

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cos \theta}{G_b \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.15)$$

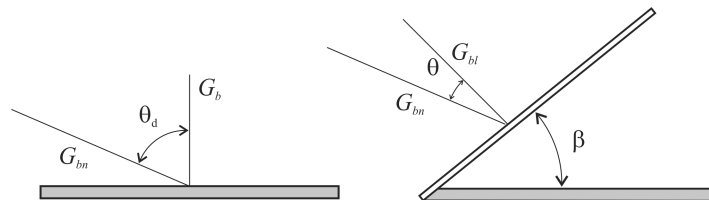


Figura 2.3: Ângulo de incidência da radiação na superfície plana e inclinada, adaptado de Duffie e Beckman (1980).

As superfícies com inclinação β , têm a mesma relação angular de radiação que uma superfície horizontal a uma latitude genérica, ou seja, $\phi - \beta$ para o hemisfério norte e $\phi + \beta$ para o hemisfério sul. Assim a Equação (2.7) se transforma em:

$$\cos \theta = \cos \delta \cos (\phi \mp \beta) \cos \omega + \sin (\phi \mp \beta) \sin \delta \quad (2.16)$$

Substituindo as equações (2.16) e (2.7) em (2.15):

$$R_b = \frac{\cos \delta \cos (\phi \mp \beta) \cos \omega + \sin (\phi \mp \beta) \sin \beta}{\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.17)$$

2.3 Radiação Extraterrestre

2.3.1 Energia Radiante

É usualmente descrita a partir das partículas de fótons, viajando em ondas transversais na velocidade da luz. Cada fóton possui um comprimento de onda γ_0 gerando uma quantidade de energia E_r . Esses são relacionados pela Equação (2.18):

$$E_r = \frac{k_p c}{\gamma_0} \quad (2.18)$$

Em que k_p é a constante de Planck, igual a $6.6 \cdot 10^{-34}$ J.s, e c é a velocidade da luz no vácuo, igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. A frequência ν da radiação é dada pelo comprimento de onda γ_0 :

$$\nu = \frac{c}{\gamma_0} \quad (2.19)$$

Logo a Equação (2.18) se transforma em:

$$E_r = k_p \nu \quad (2.20)$$

Alguns nomes foram padronizados conforme o comprimento de onda e são expressos na Figura 2.4.

Segundo Bezerra (1998) a radiação eletromagnética, vinda do sol, é distribuída em 3% de raios ultravioletas, 42% de luz visível e 55% de raios infravermelhos.

A conversão da energia solar difere dos outros sistemas de energia por um importante aspecto: a dificuldade de controle. Não é possível por exemplo acrescentar uma determinada quantidade de energia solar em um coletor, para isso seria necessário a criação de sistemas que simulassem a radiação o que obviamente se tornaria inviável financeiramente. Por isso Daniels (1978) defende a importância do estudo do comportamento do Sol possibilitando ao menos a previsão da intensidade e dos melhores meios de coletá-la.

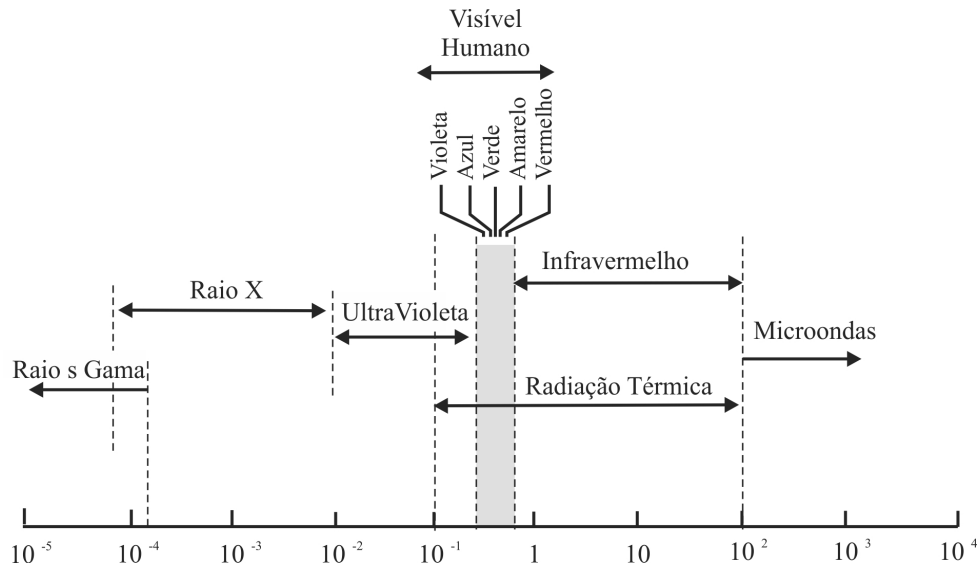


Figura 2.4: Descrição ilustrativa dos comprimentos de onda.

Segundo Kreider e Kreith (1981) há pelo menos 7 fatores principais que afetam a quantidade de incidência da radiação solar em um coletor, são eles:

- **A localização geográfica:** A eficiência do coletor solar é prejudicada quando predomina na região o clima chuvoso ou nublado.
- **Posição do Coletor:** Árvores e construções podem provocar sombras no coletor diminuindo a captação da energia.
- **Orientação do Coletor:** Os coletores que acompanham a posição do Sol mantendo seus raios na perpendicular tiram o máximo proveito da captação. Já para os que são fixos, deve-se considerar como variáveis as estações do ano e a latitude da instalação (DUFFIE; BECKMAN, 1980).
- **Tempo do Dia:** Quanto mais horas de luminosidade solar o dia tiver, maior sua eficiência.
- **Tempo do Ano:** Na maioria dos locais o verão possibilita dias com maior tempo de insolação aumentando a eficiência do coletor.
- **Condições atmosféricas:** As nuvens são capazes de reduzir a incidência da radiação em até 90%. A avaliação da energia solar pode ainda ser afetada pela umidade, presença de partículas de sujeira, poluição, etc.
- **Concepção do Coletor:** O formato do coletor ou seja se ele é inclinado, simples ou múltiplo resultará em diferentes níveis de eficiências.

2.3.2 Constante Solar

É o fluxo de energia solar que atinge a terra, por unidade de tempo, recebida em uma área de superfície perpendicular a direção de propagação da radiação. Sua medição é realizada fora da atmosfera terrestre e varia conforme a distância entre o sol e a terra.

Phillips (2010) diz que no passado, astrônomos eram tão convencidos da regularidade do sol que a chamaram de “a constante solar” e partiram para medi-la como fariam com qualquer constante da natureza. Em 1838, Claude Pouillet fez a primeira estimativa da constante solar e obteve um valor de 1228 W/m^2 , conforme Dufresne (2008). Em 1884, Samuel Pierpont Langley tentou estimar a constante solar a partir do Monte Whitney, na Califórnia ao realizar leituras em diferentes momentos do dia, ele tentou remover os efeitos devido à absorção atmosférica no entanto, o valor que obteve, 2903 W/m^2 , ainda era muito grande. Entre 1902 e 1957, as medições feitas pela equipe de Charles Greeley Abbot em vários locais de alta altitude, encontraram valores entre 1322 e 1465 W/m^2 . Abbott revelou que uma das correções de Langley foi aplicada erroneamente. Seus resultados estariam entre 1318-1548 W/m^2 , uma variação do sol e não da atmosfera da terra, conforme registrou Chisholm (1911).

A constante solar inclui todos os comprimentos de onda da radiação solar, e não apenas a luz visível. Em média pode ser considerada 1366 W/m^2 mas varia entre 1412 W/m^2 no início de janeiro até 1321 W/m^2 no início de julho, em conformidade com a distância entre o sol e a terra.

Nuvens, absorção atmosférica e outros fatores interferem nas medições da constante quando feita na superfície da terra, por isso a NASA situa os dispositivos de medição no espaço. A presença de manchas solares é um outro fator fundamental que modifica o valor da constante solar.

2.3.3 Índice de Claridade horário e diário

O índice de claridade diário (K_T) é a razão entre a radiação solar total de um dia H com a radiação solar extraterrestre no mesmo dia H_0 , conforme a Equação (2.21). As duas são mensuradas em uma superfície plana.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (2.21)$$

A relação entre a radiação total I e a radiação extraterrestre I_0 , ambas horárias e no plano horizontal, determina o valor do índice de claridade horário atmosférico (k_T),

conforme mostra a Equação (2.22):

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2.22)$$

2.3.4 Radiação extraterreste na superfície horizontal

A maioria dos cálculos que envolvem radiação supõe níveis normalizados, ou seja, níveis teóricos da radiação considerando a inexistência da atmosfera. Para isso, é necessário o uso de métodos que calculem a radiação extraterreste. Em algum ponto no tempo, a radiação solar incidente fora da atmosfera, num plano horizontal, é dada pela Equação (2.23) descrita por Duffie e Beckman (1980).

$$G_0 = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (2.23)$$

Em que G_{SC} é a contante solar e n é o numero do dia do ano. Combinando as equações (2.23) e (2.7), para qualquer instante entre o nascer e o por-do-sol:

$$G_0 = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi) \quad (2.24)$$

Integrando a Equação (2.24) tem-se a radiação solar extraterreste diária na superfície horizontal, H_0 , em J/m^2 para um período de insolação de um dia:

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{24 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left[\left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \delta \sin \phi \right) \right] \\ & \quad (2.25) \end{aligned}$$

ω_s está em graus, vindo da Equação (2.14).

Caso seja necessário calcular a radiação em uma superfície horizontal para o período de uma hora, a integração da Equação (2.25) para o período definido em ângulo hora ω_1 e ω_2 será:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left[\left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \delta \sin \phi \right) \right] \quad (2.26)$$

2.3.5 Radiação extraterreste na superfície Inclinada

O método para calcular a radiação total em uma superfície inclinada, a partir dos dados de uma superfície horizontal, requer o tratamento separado da radiação direta e difusa.

Componentes direta e difusa da radiação horária na superfície horizontal

A relação I_d/I pode ser empregada para o cálculo da radiação difusa horária na superfície horizontal, k_T , conforme cita Orgill e Hollands (1977). A correlação dessas equações é visualizada na Figura 2.5.

- Para $k_T < 0,35$:

$$\frac{I_d}{I} = 1 - 0,249k_T$$

- Para $0,35 < k_T < 0,75$:

$$\frac{I_d}{I} = 1,577 - 1,84k_T$$

- Para $k_T > 0,75$:

$$\frac{I_d}{I} = 0,177$$

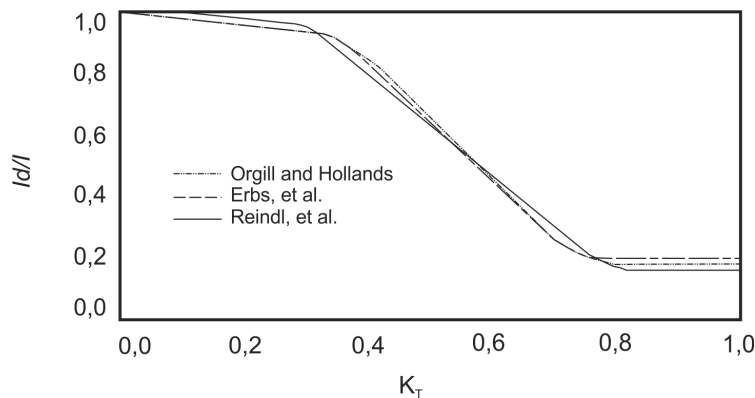


Figura 2.5: Correlações de I_d/I , adaptado de Duffie e Beckman (1980).

Outras correlações de I_d/I são citadas por Duffie e Beckman (1980).

Componentes direta e difusa da radiação diária em superfície plana

Para um dia de dados, as componentes direta e difusa são relacionadas por H_d/H e por K_T . A Figura 2.6 demonstra as seguintes correlações:

Considerando $\omega_s < 81,4^\circ$

- Para $K_T < 0,715$:

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 - 11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4$$

- Para $K_T > 0,715$

$$\frac{H_d}{H} = 0,143$$

Considerando $\omega_s > 81,4^\circ$

- Para $K_T < 0,0,722$:

$$\frac{H_d}{H} = 1 + 0,2832K_T - 2,5557K_T^2 + 0,8448K_T^3$$

- Para $K_T > 0,722$

$$\frac{H_d}{H} = 0,175$$

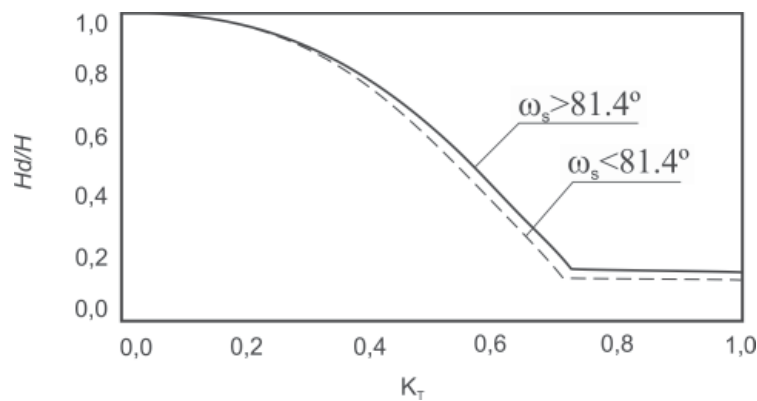


Figura 2.6: Correlação sugerida por Erbs, adaptado de Duffie e Beckman (1980).

Radiação Total em superfícies inclinadas

Coletores solares planos absorvem as componentes difusa e direta da radiação solar, geralmente medidas em uma superfície horizontal. Para adaptar os dados em uma superfície inclinada é necessário conhecer R , ou seja, a razão entre a radiação total em uma

superfície inclinada e a radiação na superfície horizontal. Uma outra componente é adicionada por Liu e Jordan (1963) na superfície inclinada a ser composto, portanto, por três componentes: radiação direta, difusa e a radiação difusa refletida a partir do solo, também conhecida como albedo, ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Refletividade de diferentes tipos de superfícies, adaptado de OKE (1987).

Condição da Superfície	Albedo
Descoberto ou exposto	10-25%
Areia(deserto)	25-40%
Gramma ou pastagem	15-25%
Floresta	10-20%
Neve (seca/molhada)	75-95% 25-75%
Vidros(janela)	08-52%
Tinta branca	50-90%
Tinta vermelha, marrom ou verde	20-35%
Concreto	10-35%
Asfalto	5-20%

Para o cálculo de R , o termo $(1 + \cos \beta)/2$ da Equação (2.27) representa o fator de visão ou fator de forma do coletor de inclinação β . O termo $(1 - \cos \beta)/2$, representa o fator de forma do coletor com a superfície circundante, ρ é a refletividade do solo para a radiação solar total, R_b é a razão entre a radiação direta horária na superfície inclinada e a radiação direta horária no plano horizontal.

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \rho \quad (2.27)$$

A radiação total horária sobre uma superfície inclinada, I_T é dada pela Equação (2.28), por um período de uma hora:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.28)$$

2.4 Concentrador Solar

2.4.1 Conceitos de Óptica

A luz pode ser considerada uma onda propagando no vácuo conforme as equações de Maxwell's , ou seja, a uma velocidade c é representada pela Equação (2.29).

$$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

Tal que ϵ_0 e μ_0 são respectivamente a permissividade elétrica ou constante dielétrica e permeabilidade magnética. Se o meio for de material transparente, a velocidade é encontrada através da Equação (2.30).

$$c = (\epsilon \mu)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

Em que ϵ e μ representam respectivamente a permissividade e a permeabilidade relativa do meio. Nos casos que condizem a adoção de $\mu=1$ a definição do índice de refração, n , é dado pela Equação 2.31.

$$n = \sqrt{\epsilon} \quad (2.31)$$

Embora seja possível desenvolver expressões aproximadas de ϵ em termos de propriedades moleculares e estrutura, a prática diz que, para os sólidos, a teoria não condiz com os resultados experimentais para frequências ópticas, conforme Born e Wolf (1975). Problema que é resolvido com a associação dos conceitos de frequências com os de ondas eletromagnéticas, incluindo os termos de absorção ou atenuação na representação da equação.

A teoria eletromagnética também produz resultados quantitativos para as proporções de luzes refletidas e transmitidas na interface, neste caso utiliza-se as equações de Fresnel. O conceito, para um ângulo de incidência diferente de zero, utiliza os termos do campo elétrico e depende da polarização. Os subscritos p e s denotam respectivamente que o componente é paralelo ou perpendicular ao plano de incidência.

As equações de Fresnel, depois da incidência do raio em um ângulo I a partir de um meio com índice de refração n e sendo r a amplitude de reflexão e t de transmissão, são:

$$r_p = \frac{n' \cos I - n \cos I'}{n' \cos I + n \cos I'} \quad (2.32)$$

$$t_p = \frac{2n' \cos I}{n' \cos I + n \cos I'} \quad (2.33)$$

$$r_s = \frac{n' \cos I' - n \cos I}{n' \cos I' + n \cos I} \quad (2.34)$$

$$t_s = \frac{2n' \cos I'}{n' \cos I' + n \cos I} \quad (2.35)$$

No cálculo correspondente a intensidade de luz por reflectância, R , seguem as equações:

$$R_p = |r_p|^2 \quad (2.36)$$

$$T_p = 1 - R_p \quad (2.37)$$

$$R_s = |r_s|^2 \quad (2.38)$$

$$T_s = 1 - R_s \quad (2.39)$$

No entanto, T_p e T_s não são tão simples de serem resolvidos em um meio muito absorvente. As fórmulas de Fresnel calculam precisamente a proporção de luz refletida em superfícies de vidro, plástico e, com um índice adequado, em superfícies metálicas.

Há certos casos especiais, por exemplo ao passar de um meio mais denso para um menos denso (ou seja, $n' > n$), acima de um ângulo de incidência conhecido como ângulo crítico, que toda a luz é refletida e $R_s = R_p = 1$. Este fenômeno é conhecido como reflexão total. O ângulo crítico é de aproximadamente 41° quando passa do vidro para o ar.

A reflectância em tais condições é de 100% mas traços de sujeira na superfície e irregularidades no plano de reflexão a diminuem (DANIELS, 1978). Este fenômeno de reflexão total é potencialmente de grande utilidade em aplicações de transmissão de potência óptica e concentração.

2.4.2 A Trajetória da Luz

Para conhecer os procedimentos de determinação da trajetória de luz é conveniente citar as leis de reflexão e refração na forma vetorial. A Figura 2.7 mostra a geometria do vetor unitário r e r'' pela trajetória de incidência e reflexão do raio, o vetor n é o vetor unitário da normal, perpendicular a superfície refletida. A lei de reflexão é expressa pela Equação vetorial (2.40), conforme cita Winston Juan C. Miñano (2005).

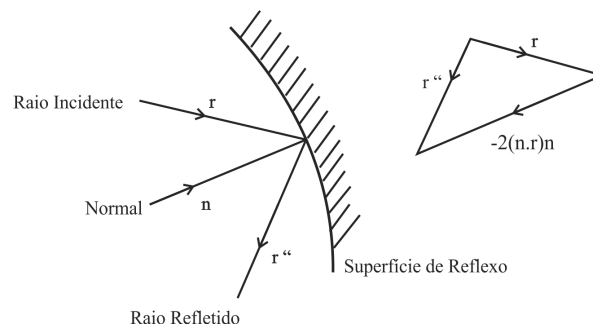


Figura 2.7: Vetor da reflexão.

$$r'' = r - 2(n \cdot r) n \quad (2.40)$$

O primeiro passo para traçar a trajetória do raio de reflexão é encontrar o ponto de incidência P , depois, conhecido o formato da superfície de reflexão traça-se n , que é o raio normal à superfície e finalmente, utiliza-se a Equação (2.40) para achar a direção de r'' conforme ilustrado na Figura 2.8, o processo deve ser repetido se houver outras reflexões. É comum que os raios do vetor unitário sejam representados por componentes no plano cartesiano.

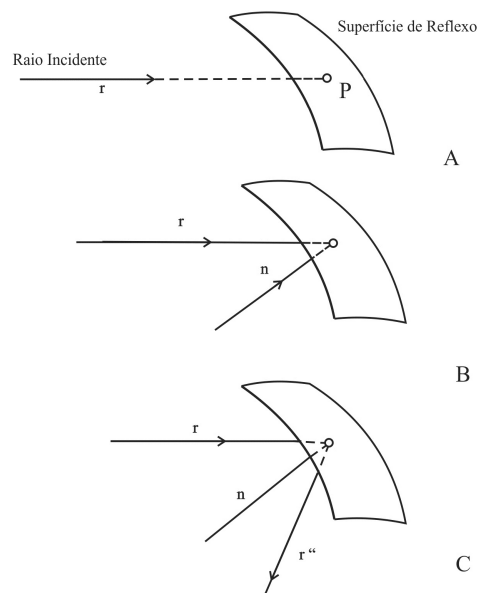


Figura 2.8: Estágios da trajetória da luz para reflexão.

2.4.3 Imagem formada por espelhos

Considere um espelho parabolóide simples, como na Figura 2.9, ele concentra os raios paralelos ao eixo exatamente no ponto de foco, ou em outra terminologia, não tem aberração esférica. No entanto, fora do eixo os feixes de luz sofrem aberrações.

Assim, na seção meridiana (a seção do diagrama), pela trajetória de luz, o raio com ângulo θ encontra o plano focal maior a partir do eixo do raio central, na linha tracejada da Figura 2.9, este não é um concentrador ideal mesmo para raios emergentes com ângulos muito menores que $\pi/2$ (KREIDER; KREITH, 1981).

A Figura 2.10, ilustra um círculo que passa através das extremidades do espelho e do absorvedor (ou seja, da fenda de saída). Conforme propriedade da circunferência, se o absorvedor forma um ângulo de $4\theta_{max}$ com o centro do círculo, e subtende um ângulo

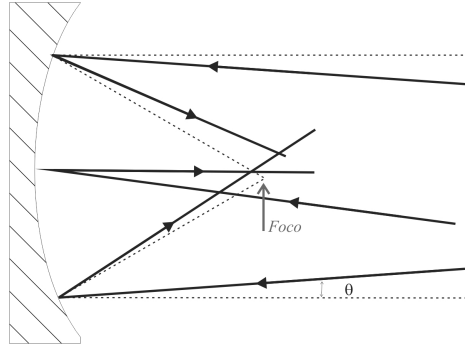


Figura 2.9: Imagem de incidência para um espelho parabolóide.

de $2\theta_{max}$ com as extremidades do espelho, então o ângulo de coleta é de $2\theta_{max}$.

O espelho não é especificado para ter de uma forma em particular, exceto quando deva refletir todos os raios para o interior da fenda de saída. A Equação (2.41) é utilizada quando o espelho forma 2ϕ com o centro do círculo.

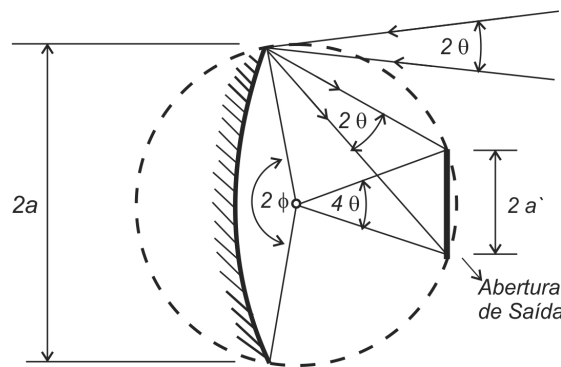


Figura 2.10: Coleta de raios do espelho côncavo.

$$\frac{a'}{a} = \frac{\sin 2\theta_{max}}{\sin \phi} \quad (2.41)$$

O valor mínimo de a' é atingido quando $\phi = \pi/2$. Neste ponto a taxa de concentração óptica é, considerando as obstruções causadas pelo absorvedor, inferior a 25% em relação a concentração máxima teórica e menos de 50% do ideal para o ângulo emergente utilizado.

$$\left(\frac{a'}{a}\right)^2 - 1 = \frac{1}{4 \sin \theta_{max}} \left(\frac{\cos^2 2\theta_{max}}{\cos^2 \theta_{max}}\right) \quad (2.42)$$

Se o espelho é parabolóide, os raios utilizados para este cálculo são os raios extremos, ou seja, os raios fora do plano do diagrama e dentro do círculo de raio a' .

A alta perda da concentração em fendas grandes é causada, basicamente, porque o espelho côncavo simples utilizado dessa maneira tem grande difusividade luminosa, em

outras palavras, não satisfaz a condição do seno de Abbe, Equação (2.43). Em que n' é o índice de refração da imagem, h é a distância do raio de incidência até o eixo, f é o comprimento focal e α' é o ângulo no qual o raio encontra o eixo, conforme Figura 2.11 .

$$h = n' \sin \alpha' f. \quad (2.43)$$

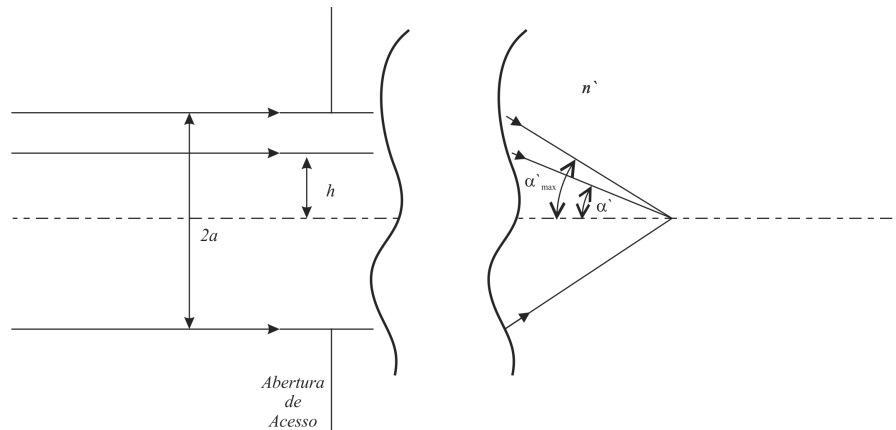


Figura 2.11: Definição numérica de abertura em um sistema de imagem.

Porém, existem sistemas de formação de imagens que satisfazem a condição do seno de Abbe e têm grandes fendas relativas. Um protótipo desses é a câmara Schmidt, que tem uma placa esférica ou seja, possui uma superfície rotacionalmente simétrica sem ser esfera, e um espelho esférico côncavo, como mostrado na Figura 2.12.

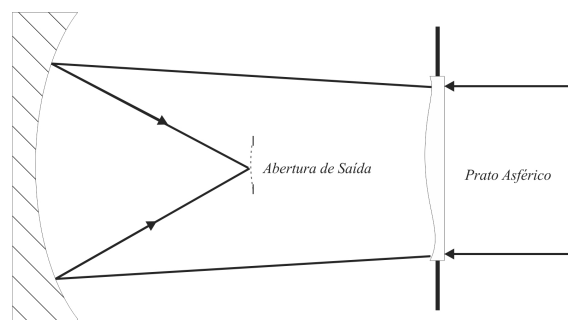


Figura 2.12: Figura esquemática da câmara de Schmidt.

A placa esférica está no centro de curvatura do espelho devendo ser, portanto, maior que a abertura de coleta. Tal sistema tem o índice de concentração ideal para um ângulo de saída restrito a partir da obstrução central, mas tem dificuldades práticas na obtenção do máximo teórico. Em qualquer caso, um sistema dessa complexidade não deve ser considerada seriamente para um trabalho solar (KREIDER; KREITH, 1981).

2.4.4 Configuração do Coletor

Alguns tipos de concentradores são possíveis para incrementar o fluxo de radiação no receptor, eles podem ser refletores ou refratores, cilíndricos (foco linear) ou circulares (foco pontual). Os receptores podem ser côncavos, planos ou convexos como apresentados na Figura 2.13.

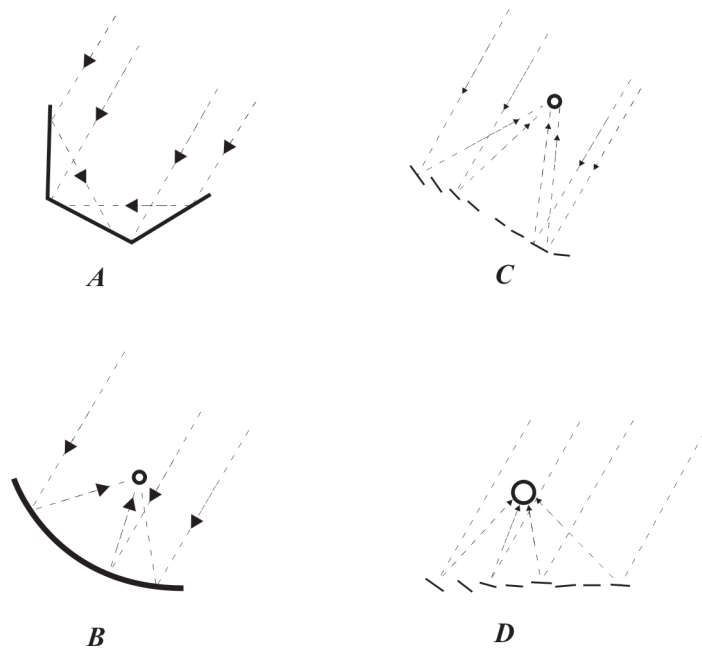


Figura 2.13: Configurações de coletores solares, adaptado de Duffie e Beckman (1980).

O receptor *A* da Figura 2.13, possui lados de reflexão planos. Sua taxa de concentração de raios solares é a menor dos quatro modelos apresentados. Uma análise mais profunda deste modelo é estudada por Selcuk (1979). O receptor *B* possui uma seção de reflexão parabólica que pode ser uma superfície cilíndrica com um receptor tubular ou uma superfície de revolução com um receptor esférico ou hemisférico.

Já o receptor *C* da Figura 2.13 é conhecido como refletor Fresnel, possui refletores planos que se movem em uma matriz. As faces do refletor podem ser também individualmente movimentadas e ajustadas como no modelo *D*, muitas estações solares são desse tipo, com receptores montados e voltados para uma torre conforme a Figura 2.14.

O sistema óptico linear terá foco de radiação direta para o receptor se o sol estiver no plano central do concentrador, ou seja, no plano, incluindo o eixo central e a linha do vértice do refletor. Para que esse sistema aconteça, é possível rotacionar um eixo simples sentido norte-sul, leste-oeste ou inclinando-o paralelamente ao eixo da terra, que neste caso, terá uma variação de 15° /hora, como já foi dito em seções anteriores.

Esses sistemas dependem de ajustes para acompanhar as mudanças horárias da posição