

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

**TIAGO TERRA PARRA DE ALMEIDA**

**LAGOAS SOLARES DE GRADIENTE SALINO,  
ESTUDO E ANÁLISE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA**

**2015**

**TIAGO TERRA PARRA DE ALMEIDA**

**LAGOAS SOLARES DE GRADIENTE SALINO,  
ESTUDO E ANÁLISE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao curso de Engenharia de  
Produção Civil do Departamento Acadêmico de  
Construção Civil – DACOC - da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná como requisito  
parcial para obtenção do título de Engenheiro de  
Produção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Azevedo Cardoso

**CURITIBA**

**2015**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **LAGOAS SOLARES DE GRADIENTE SALINO, ESTUDO E ANÁLISE**

Por

**TIAGO TERRA PARRA DE ALMEIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 03 de dezembro de 2015, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Ivan Azevedo Cardoso, Dr.  
UTFPR

---

Profa. Jair Urbanetz Junior, Dr.  
UTFPR

---

Prof. Jair Ferreira de Almeida, Dr.  
UTFPR

## RESUMO

ALMEIDA, Tiago T. P. Lagoas Solares de Gradiente Salino, Estudo e Análise. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O presente trabalho apresenta o dispositivo de coleta e armazenamento de energia solar – conhecido como *lagoa solar de gradiente salino*. O estudo consiste em um breve histórico dessa tecnologia desde a observação do fenômeno das lagoas solares naturais até as maiores e mais atuais aplicações. Foi realizada uma análise de sistemas instalados na Índia e Estados Unidos, apontando os desafios encontrados e o desempenho das lagoas. O trabalho também apresenta os componentes de um sistema de coleta de energia térmica, a construção de uma lagoa solar, sua operação e estuda as condições necessárias para a estabilidade do perfil de salinidade. Um sistema de equações que modele teoricamente o funcionamento de uma lagoa solar foi proposto. Ao fim das análises ficaram esclarecidos os principais aspectos desse tipo de coletor, seu funcionamento e principais aplicações potenciais.

**Palavras-chave:** energia solar; energia térmica; lagoas solares de gradiente salino.

## ABSTRACT

ALMEIDA, Tiago T. P. Salt Gradient Solar Ponds, Study and Analysis. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This research presents the solar energy collection and storage device - so called *salt gradient solar pond*. The study consists on a short history of this technology, since its first observation as a natural phenomenon, until its largest and most recent applications. A review of systems installed in India and U.S.A., was performed to analyze which were the difficulties found and the system's performance. The study also displayed a thermal energy capture system components, a solar pond construction, its operation and analyses the necessary conditions for the salt gradient stability. An equations system that models the theoretical operation of a solar pond was proposed. At the end of the analysis, enough data was shown to bring clarity about the mains aspects of this kind of collector, its function and main potential applications.

**Keywords:** solar energy; thermal energy; salt gradient solar ponds.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fornalha solar de Lavoisier .....	4
Figura 2- Prensa alimentada por energia solar/Paris 1878 .....	5
Figura 3 - Cobertura de nuvens .....	16
Figura 4 - Massa de ar.....	17
Figura 5 - Caminho do sol.....	18
Figura 6 - Declinação solar .....	19
Figura 7 - Ângulo de elevação solar.....	20
Figura 8 - Ângulo azimutal .....	22
Figura 9 - Tela inicial RadiaSol2 .....	24
Figura 10 - Entrada de dados.....	25
Figura 11 - Variação horária da radiação inclinada em Curitiba/PR .....	26
Figura 12 - Corte transversal de uma lagoa solar de gradiente salino .....	29
Figura 13 - Difusor de água fresca .....	33
Figura 14 - Sistema de dessalinização MSF.....	37
Figura 15 - Revestimento da superfície da lagoa.....	41
Figura 16 - Sistema de dissolução de sal.....	42
Figura 17 - Trocador de calor "Shell and Tube" .....	47
Figura 18 - Histórico de temperaturas na LCZ de Bhuj.....	49
Figura 19 - Sistema físico de uma lagoa solar de gradiente salino.....	56
Figura 20 - Mapa de radiação solar no Brasil .....	61
Figura 21 - Mapa de radiação solar da Índia .....	61
Figura 22 - Mapa de radiação solar de Israel .....	62

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Projeção do Consumo de Energia no Mundo.....	20
Gráfico 2 - Previsão do Crescimento Populacional do Brasil.....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de funcionamento de uma lagoa solar de gradiente salino.....	73
Tabela 2 - Radiação Solar Média.....	76
Tabela 3 – Rendimento médio de lagoas solares.....	76



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\frac{dS}{dx}$  – Gradiente de salinidade com a profundidade;

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura com a profundidade;

$\Delta T$  – Diferença de temperatura

$\alpha$  - Elevação solar

$A_{2/3}$  - Área de contato das camadas LCZ e NCZ

$A_b$  - Área do fundo da lagoa

ABDI - Associação Brasileira do Desenvolvimento Industrial

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica

AM – Massa de ar

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

$A_s$  – Área de superfície do corpo d'água.

ASEC - Comissão de Energia Solar do Arizona

ATRC - Centro de Pesquisa em Transportes do Arizona

$A_z$  – Ângulo azimutal

CSIRO - Organização de Pesquisa Industrial e da Comunidade Científica de Melbourne

$e_{lcz}$  – Espessura da camada LCZ

EMC/UFSC - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina

$e_{ncz}$  - Espessura da camada NCZ

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

$e_{ucz}$  - Espessura da camada UCZ

$f_{h_2o}$  – Fração molar de água no ar atmosférico

GDCC - Corporação de Desenvolvimento de Laticínios de Gujarat

GEDA - Agência de Desenvolvimento Energético de Gujarat

$h_{ar}$  – Coeficiente de convecção do ar ( $W/m^2.K$ )

HDPE - Polietileno de alta densidade

$H_{iso}$  - Espessura do isolamento entre LCZ e o solo

$h_{lcz}$  – Coeficiente de convecção da água na camada LCZ

$h_{ucz}$  - Coeficiente de convecção da água na camada UCZ

$I_0$  - Radiação solar na superfície da lagoa

$I_{1/3}$  - Radiação solar que alcança 1/3 da profundidade da lagoa

$I_{2/3}$  - Radiação solar que alcança 2/3 da profundidade da lagoa

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná

$I_{lcz}$  - Radiação que atinge o fundo da lagoa

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

$I_x$  – Radiação solar que alcança a profundidade x

$K_{iso}$  - Condutividade térmica do isolamento entre LCZ e o solo

$k_{lcz}$  – Condutividade térmica da água na camada LCZ

$K_{lcz}$  - Condutividade térmica da camada limite entre LCZ e NCZ

$k_{ncz}$  - Condutividade térmica da água na camada NCZ

$k_{ucz}$  - Condutividade térmica da água na camada UCZ

$kW_{th}$  – Quilowatt térmico

LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar

LCZ - Lower Convecting Zone/Região convectiva inferior

LDPE - Polietileno de baixa densidade

LT – Local Time

MEE – Destilação Multiestágios

MSF – Destilação Flash de Múltiplos Estágios

MIT - Massachusetts Institute of Technology

MME - Ministério de Minas e Energia

MNES - Ministério de Energias Não-Convencionais da Índia

NCZ - Non-Convecting Zone/Região não-convectiva

OSW - Office of Saline Water of the USA

P – Pressão atmosférica

$P_{atm}$  – Pressão atmosférica

$P_{v,ar}$  – Pressão de vapor do ar que circula sobre o corpo d'água

$P_{v,sup}$  – Pressão de vapor da superfície do corpo d'água

PVC – Policloreto de polivinila

$q$  – Transferência de calor

$Q_{cond,2/3-1/3}$  – Calor transferido por condução para a camada UCZ

$Q_{cond,b-2/3}$  – Calor recebido por condução da camada NCZ

$Q_{cond,b-2/3}$  – Calor perdido por condução para a camada NCZ

$Q_{cv}$  – Calor perdido para a atmosfera por convecção

$Q_{ev}$  – Calor perdido através da evaporação da água da UCZ

$Q_{fw}$  – Calor perdido pela adição de água fresca para manter o nível da lagoa

$Q_g$  – Calor perdido por condução para o solo

$q_{lcz}$  – Fluxo de calor pela camada LCZ

$q_{ncz}$  – Fluxo de calor pela camada NCZ

$Q_{ov}$  – Calor perdido pelas perdas de água da UCZ por perturbações criadas pelo vento (overflow)

$Q_{rad}$  – Calor perdido para a atmosfera por radiação.

$Q_u$  – Calor útil

$q_{ucz}$  – Fluxo de calor pela camada UCZ

$R$  – Resistência térmica

REF-UFRGS - Centro de Referência para o Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$R_{lcz}$  – Resistência térmica da camada LCZ

$R_{ncz}$  – Resistência térmica da camada NCZ

$R_{ucz}$  – Resistência térmica da camada UCZ

$T_{2/3}$  - Temperatura do limite inferior da camada NCZ

$T_{air}$  – Temperatura do ar que circula sobre o corpo d'água

$T_{ar}$  – Temperatura do ar que circula sobre o corpo d'água

$T_{atm}$  – Temperatura atmosférica

$T_b$  - Temperatura do fundo da lagoa

TERI - Instituto de Pesquisas Energéticas Tata  
 $T_s$  – Temperatura da superfície do corpo d'água  
 $U_{\%}$  - Umidade relativa do ar  
UCZ - Uper Convecting Zone/Região convectiva superior  
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UTEP - Universidade do Texas em El Paso  
 $V$  – Coeficiente de transferência térmica de convecção.  
 $V_{ar}$  – Velocidade do vento sobre a superfície da lagoa  
 $x$  – Profundidade  
 $\alpha_t$  – Coeficiente de expansão térmica da água;  
 $\beta_t$  – Coeficiente de expansão salina da água;  
 $\delta$  – declinação solar  
 $\Delta T$  – Quantidades de horas antes ou após o meio dia solar  
 $\Theta$  – Ângulo zenital  
 $\theta$  – Latitude  
 $\theta_r$  – Ângulo de refração na superfície da lagoa  
 $\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

## LISTA DE FÓRMULAS E EQUAÇÕES

- 1 -  $AM = \frac{1}{\cos \theta}$
- 2 -  $\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (d - 81)\right)$
- 3 -  $\alpha = 90 - \theta + \delta$  (hemisfério norte)
- 4 -  $\alpha = 90 + \theta - \delta$  (hemisfério sul)
- 5 -  $LT = 0^\circ \pm 15^\circ \cdot \Delta T$
- 6 -  $A_z = \cos^{-1} \left( \frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\theta) - \cos(\delta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(LT)}{\cos(\alpha)} \right)$
- 7 -  $\eta = 1 - \frac{T_q}{T_f}$
- 8 -  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$
- 9 -  $\alpha_t \cdot \frac{dT}{dx} \leq \beta_t \cdot \frac{dS}{dx}$
- 10 -  $(I_{lcz} \cdot A_b) - Q_g - Q_u - Q_{cond,b-2/3} = 0$
- 11 -  $Q_g - \frac{k_{iso}}{e_{iso}} \cdot A_b \cdot (T_b - T_g) = 0$
- 12 -  $Q_{cond,b-2/3} - \frac{1}{R_{lcz}} \cdot (T_b - T_{2/3}) = 0$
- 13 -  $Q_{cond,b-2/3} + (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cond,2/3-1/3} = 0$
- 14 -  $Q_{cond,2/3-1/3} - \frac{1}{R_{ncz}} \cdot (T_{2/3} - T_{1/3}) - (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b = 0$
- 15 -  $Q_{cv} - h_{ar} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ar}) = 0$
- 16 -  $Q_{rad} - \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{atm}^4) = 0$
- 17 -  $(I_0 - I_{1/3}) \cdot A_b + Q_{cond,2/3-1/3} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0$

$$18 \quad - \quad \left( I_{lcz} + (I_{1/3} - I_{2/3}) \right) \cdot A_b - Q_g - Q_u - Q_{cond,2/3-1/3} = 0$$

$$19 \quad - \quad Q_{cond,b-2/3} + (I_0 - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0$$

$$20 \quad - \quad -Q_u + I_o \cdot A_b - Q_g - Q_{sup} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} = 0$$

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	2
2.1	OBJETIVOS GERAIS .....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
3.	JUSTIFICATIVA .....	2
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
4.1	HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR .....	4
4.2	DESSALINIZAÇÃO .....	7
4.3	SECAGEM .....	9
4.4	SOL COMO FONTE DE ENERGIA .....	9
4.5	POTENCIAL ENERGÉTICO MUNDIAL .....	10
4.6	POTENCIAL ENERGÉTICO NACIONAL E DA REGIÃO SUL .....	11
4.7	PROJEÇÃO DO CONSUMO MUNDIAL .....	11
4.8	PROJEÇÃO DO CONSUMO NACIONAL .....	13
4.9	VARIAÇÕES NA RADIAÇÃO SOLAR .....	14
4.9.1	EFEITOS ATMOSFÉRICOS .....	14
4.9.2	ABSORÇÃO NA ATMOSFERA .....	14
4.9.3	RADIAÇÃO DIRETA E DIFUSA .....	15
4.9.4	VARIAÇÕES LOCAIS DA ATMOSFERA .....	15
4.9.5	MASSA DE AR .....	17
4.9.6	MOVIMENTO DO SOL .....	18
4.9.7	DECLINAÇÃO SOLAR .....	19
4.9.8	ÂNGULO DE ELEVAÇÃO .....	20
4.9.9	HORA SOLAR E ÂNGULO AZIMUTAL .....	21
4.9.10	RADIAÇÃO ANUAL NO BRASIL .....	23
4.10	ANÁLISE COMPUTACIONAL .....	23
5.	LAGOAS SOLARES .....	27
5.1	TIPOS DE LAGOAS .....	27
5.1.1	CONVECTIVAS .....	27
5.1.2	NÃO CONVECTIVAS .....	28
5.1.3	LAGOAS SOLARES DE GRADIENTE SALINO .....	28

5.2	APLICAÇÕES DAS LAGOAS SOLARES.....	30
5.3	RETIRADA DO CALOR ÚTIL.....	31
5.4	EFICIÊNCIA MÁXIMA TEÓRICA .....	31
5.5	ESTABILIDADE DE LAGOAS SOLARES.....	32
5.5.1	CRIAÇÃO DO GRADIENTE DE SALINIDADE.....	33
5.5.2	ESTABILIDADE ESTÁTICA DO GRADIENTE.....	35
5.6	DESSALINIZAÇÃO.....	36
5.7	ESTUDO DA LAGOA DE KUTCH DAIRY .....	38
5.7.1	Fase 1: Construção da lagoa.....	38
5.7.2	Fase 2: Análise de falhas .....	44
5.7.3	Fase 3: Reestabelecimento e fornecimento de água quente . .....	45
5.7.4	Fase 4: Adição de sal e renovação do fornecimento de água quente .....	48
5.8	ESTUDO DA LAGOA DE GRAY MOUNTAIN/ASEC.....	49
5.8.1	CONSTRUÇÃO DA LAGOA.....	51
5.8.2	ESTABILIZAÇÃO DO GRADIENTE SALINO .....	52
5.8.3	EXTRAÇÃO DE CALOR .....	53
5.8.4	INSTRUMENTALIZAÇÃO DA LAGOA.....	54
5.8.5	CONCLUSÕES SOBRE A EXPERIÊNCIA DE GRAY MOUTAIN .....	54
5.9	MODELO DE FUNCIONAMENTO.....	55
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
7.	CONCLUSÕES.....	64
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	65
9.	REFERÊNCIAS.....	66
10.	APÊNDICE I .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O atual cenário socioeconômico tornou evidente a necessidade de uma reformulação na matriz energética tradicional. A previsão da escassez dos combustíveis fósseis tradicionais e a degradação do meio ambiente causada pela transformação do mesmo trouxeram para as discussões acadêmicas o desafio da geração de energia com o mínimo de impacto ambiental.

A energia da radiação solar se apresenta como uma alternativa promissora para diversos fins, uma tecnologia que pode contribuir para a abundância de energia num futuro com uma demanda energética maior do que a atual.

Lagoas solares são sistemas de coleta e armazenamento de energia solar. Esses sistemas foram bastante experimentados e testados nos anos 80-90, impulsionados pela crise do petróleo, mas suas aplicações se estendem até os dias de hoje. Coletores solares dessa configuração podem ser utilizados para o aquecimento de piscinas e estufas, pré-aquecimento em processos industriais, secagem de grãos, dessalinização e geração de energia elétrica.

Lagoas solares de gradiente salino são, muito provavelmente, o tipo de coletor solar de mais simples instalação e operação, utilizando somente o gradiente salino da água para a coleta e aprisionamento da energia solar.

Este trabalho irá apresentar o histórico da manipulação da energia provinda do sol e suas diferentes aplicações, a demanda energética mundial e nacional bem como os potenciais de geração de energia a partir da radiação solar, o conceito de lagoas solares, lagoas solares de gradiente salino, sua composição, construção e operação, aplicações potenciais e o estudo de dois casos de aplicação real desse sistema.

Através de uma revisão bibliográfica de caráter exploratório, utilizando das principais publicações acerca do tema, espera-se difundir a tecnologia das lagoas solares de gradiente salino, pouco conhecidas no Brasil, mas com grande potencial de aplicação em território nacional.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GERAIS**

Apresentar os coletores solares e armazenadores de energia solar de grande escala conhecidos como lagoas solares, seu funcionamento, aplicações e limitações.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudar e apresentar o sistema coletor solar conhecido como lagoa solar de gradiente salino, seu funcionamento e estabilidade, principais aplicações e histórico;
- Estudar a demanda energética que poderia ser atendida por desse tipo através da análise de projetos executados;
- Comparar as condições ambientais e principais utilizações das lagoas solares em operação e as condições ambientais e utilizações potenciais de lagoas no Brasil;
- Estudar os parâmetros ambientais que influenciam o comportamento de uma lagoa solar.

## **3. JUSTIFICATIVA**

A transformação de energia química em trabalho, possibilitada pela máquina a vapor de Watt, impulsionou a humanidade em sua era de maior abundância e crescimento populacional. A popularização desta tecnologia e dos seus consequentes benefícios criou uma relação entre o acesso a combustíveis fósseis de uma nação e o seu grau de industrialização, e assim se estabeleceu a relação de dependência entre combustíveis fósseis, produção industrial e nível de consumo de uma população.

Ainda que a energia solar fosse conhecida e inclusive tenha sido utilizada para alimentar maquinários semelhantes aos de Watt, a utilização do carvão possibilitou a criação de equipamentos significativamente menores, móveis e com fornecimento de energia praticamente invariável com o passar dos dias e noites e do ano. Ainda hoje, máquinas de combustão interna movem quase todos os ramos da indústria e do transporte, uma situação que praticamente não sofreu mudanças desde o século XIX. No entanto, hoje não se pode mais

ignorar a questão ambiental e a não renovação desses recursos que são sabidamente finitos.

Este novo cenário, onde o desenvolvimento e progresso deram lugar à crise energética e ambiental, tornou o debate ambiental relevante e indispensável e a procura por novas fontes de energia que sejam renováveis e tecnologicamente viáveis um desafio a ser vencido por esta geração.

A tecnologia de lagoas solares foi mais intensamente estudada entre a metade dos anos 70 e os anos 90, motivada por um desafio semelhante, a crise do petróleo e o cartel dos países produtores. Hoje, essas lagoas ressurgem como uma alternativa para a geração de energia térmica em baixas temperaturas em uma grande quantidade de processos.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR

O sol é a fonte de energia mais antiga já utilizada, sua primeira utilização prática foi na secagem de alimentos para sua preservação. Provavelmente, a mais antiga utilização em larga-escala conhecida seja a queima de uma frota Romana na baía de Syracuse, creditada, mas não comprovada, ao filósofo e matemático Archimedes (287-212 A.C.). Cientistas discutiram este evento por séculos, de 100 A.C. à 1.100 D.C. O matemático polonês Vileio descreveu o aparato de Archimedes em detalhes no seu livro *Optics Vitelio*, e Athanasius Kircher (1601-1680) conduziu experimentos para verificar a validade científica da história da baía de Syracuse (Kalogirou, 2009).

Durante o século 18, fornalhas solares foram utilizadas para derreter ferro, cobre e outros metais, construídas com ferro polido, lentes de vidro e espelhos, e utilizadas por toda a Europa e Oriente Médio. Por volta de 1774, o renomado químico Lavoisier construiu uma fornalha solar que, utilizando uma lente principal de 1,32m e uma secundária de 0,20m, atingiu a temperatura de 1750 °C, a temperatura mais alta atingida em uma fornalha deste tipo pelos 100 anos que seguiram (Figura 1).

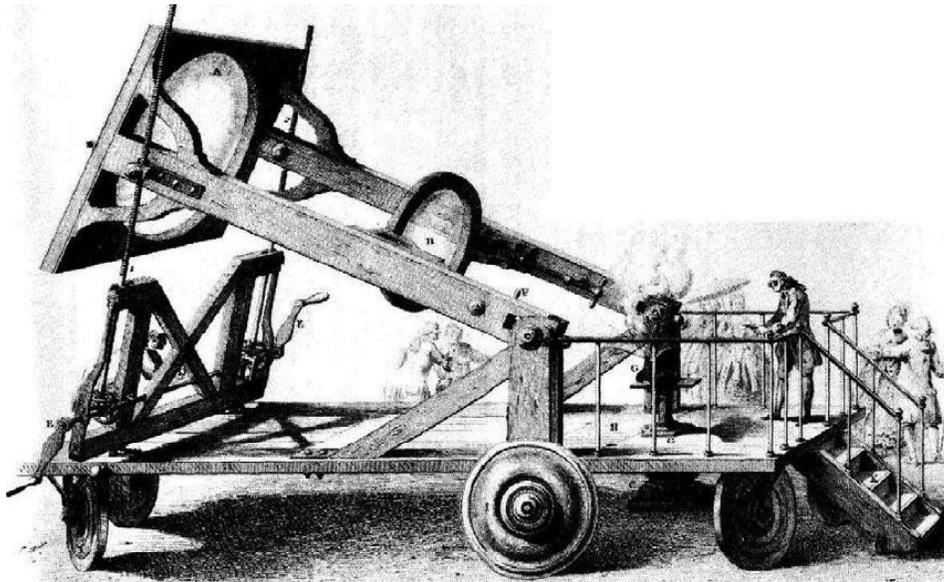
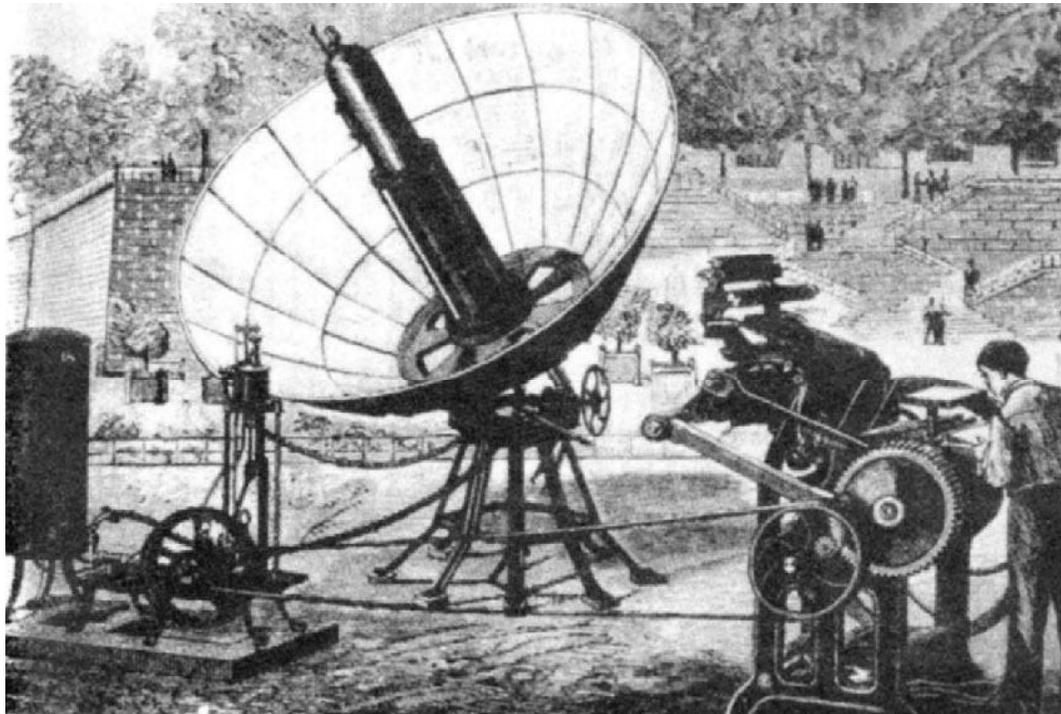


Figura 1 - Fornalha solar de Lavoisier

Fonte: Kalogirou, 2009.

No século seguinte, Augustin Bernard Mouchot (1825-1911) construiu e operou diversos motores movidos a vapor de baixa pressão e alimentados pela energia solar na Europa e no norte da África, entre 1864 e 1878. A máquina impressora alimentada por um coletor solar parabólico esteve presente na Exibição Internacional de Paris de 1878 (Figura 2). Abel Pifre (1852-1928), iniciou sua carreira como assistente de Mouchot e acabou por desenvolver seus próprios dispositivos, também utilizando a radiação solar como fonte de energia.



**Figura 2- Prensa alimentada por energia solar/Paris 1878**

**Fonte: Kalogirou, 2009.**

Do outro lado do Atlântico, John Ericsson (1803-1889), engenheiro Suéco que se tornou conhecido pelo projeto da locomotiva a vapor Novelty e pelo USS Monitor, também estudou a utilização da energia solar como fonte de energia de motores a vapor. Seus projetos utilizavam coletores parabólicos e calhas parabólicas e utilizavam tanto a água quanto o ar como fluidos de trabalho (Kalogirou, 2009).

Em 1912, o engenheiro norte-americano Frank Shuman (1862-1918), construiu, com a colaboração de Sir Charles Venon Boys (1855-1944), a então maior planta de bombeamento de água do mundo, em Meadi, Egito. O sistema entrou em operação em 1913 utilizando longos cilindros parabólicos para focar a radiação solar em tubos de absorção. Cada cilindro media 62m de comprimento e a área de captação total era de 1.200m<sup>2</sup>. Quando em pleno funcionamento, a planta produziu entre 37 e 45 kW continuamente por 5 horas.

Apesar do sucesso da usina, suas operações foram completamente encerradas em 1915 devido à Primeira Guerra Mundial e aos baixos preços dos combustíveis fósseis.

Ironicamente, os coletores de concentração utilizados em todos os projetos citados são, por sua natureza (geometrias intrincadas e de medidas exatas) e pela necessidade de acompanhar o movimento do sol durante o dia e o ano, o tipo de coletor de mais difícil aplicação (Kalogirou, 2009).

Nos últimos 50 anos, várias alterações foram feitas no design e construção de coletores de radiação solar como meio de aquecer fluidos de trabalho para alimentar equipamentos mecânicos. Os dois principais tipos de coletores de concentração utilizados são os receptores centrais e receptores distribuídos, utilizando vários pontos e linhas focais para concentrar a luz solar. Receptores centrais utilizam várias linhas de heliostatos (espelhos planos de rastreamento da posição solar) para focalizar a radiação solar em um único ponto elevado. Receptores distribuídos incluem antenas parabólicas, lentes Fresnel e calhas parabólicas para acumular a luz em um ponto ou linha de acumulação. A diferença entre estes sistemas é, basicamente, de escala. Enquanto receptores distribuídos atingem temperaturas não muito superiores à 100 °C, receptores centrais se aproximam de 1.500 °C.

Atualmente, várias usinas solares têm potências na ordem dos megawatts. As usinas solares que não geram energia elétrica geram vapor superaquecido, em temperaturas próximas à 399,85° C, para processos industriais. A primeira usina solar comercial foi instalada em Albuquerque, Novo México, em 1979. Ela contava com 220 heliostatos e atingiu uma potência de saída de 5 MW. A segunda usina foi construída em Barstow, Califórnia, com potência de saída termal total de 25 MW.

Outra área de interesse, o aquecimento de água para consumo e aquecimento domiciliar, surgiu na metade da década de 30, mas recebeu mais interesse nos anos 40. Até então, milhões de casas eram aquecidas através de caldeiras abastecidas a carvão. Muitas vezes, quando da substituição do sistema de aquecimento a carvão pelo solar, a água que era aquecida pela radiação solar alimentava os radiadores já existentes.

A manufatura de aquecedores solares para uso domiciliar teve início no começo da década de 60. O aquecedor solar mais difundido para esse fim foi o termo sifão, que consiste em duas placas coletoras com áreas entre 3 e 4m<sup>2</sup> e um tanque de armazenamento com capacidade de 150 a 180L. Um aquecedor de imersão elétrico é instalado dentro do tanque de armazenamento para compensar os períodos de pouca incidência de radiação solar (Kalogirou, 2009).

## 4.2. DESSALINIZAÇÃO

A proximidade de fontes de água sempre foi uma das principais preocupações dos agrupamentos humanos, bem como a falta de água potável um de seus maiores problemas e desafios. Compreensivelmente, entre as primeiras aplicações da energia solar estavam equipamentos que dessalinizavam a água do mar. No século 4 A.C., Aristóteles descreveu um método para evaporar águas impuras e obter, através da condensação, água potável. Entretanto, uma das primeiras aplicações da dessalinização de água do mar através de destilação ocorreu bastante depois de Aristóteles e não através da energia solar. As anotações e ilustrações de Alexandre de Afrodisias descrevem marinheiros fervendo água do mar em vasos de cobre com esponjas em suas bocas para absorver a água evaporada.

O registro mais antigo de dessalinização solar foi documentado por Mouchot em 1869. Segundo ele, químicos árabes do século 15 utilizavam espelhos Damasco para este fim. Até a idade média não houveram aplicações importantes da dessalinização através da energia solar. Já neste período, a energia solar foi bastante utilizada também para aquecer alambiques que, por sua vez, foram utilizados para concentrar dilutos em soluções alcóolicas ou extratos herbais para fins medicinais, produzir vinhos e óleos aromáticos. Mouchot descreveu a utilização de espelhos côncavos para focar a radiação solar em frascos contendo água salgada e produzir água potável. Incluindo acumuladores lineares.

Anos depois, durante a Renascença, o cientista Giovanni Batista Della Porta (1535-1615) escreveu diversos livros que foram traduzidos para o Francês, Italiano e Alemão. Em um deles, o *Magiae Naturalis* de 1558, ele menciona três sistemas distintos de dessalinização. Uma segunda edição foi lançada em 1589, agora listando sete métodos. Dentre eles o método mais importante utilizava energia solar para converter água salobra em doce. Este método não utilizava espelhos ou lentes, mas potes cerâmicos que quando expostos à intensa radiação solar evaporavam a água no seu interior. Esta, por sua vez, condensava e era conduzida aos outros vasos cerâmicos, posicionados sob os primeiros e protegidos do sol (Kalogirou, 2009).

Por volta de 1774, o francês Lavoisier também realizou experimentos envolvendo dessalinização e energia solar e em 1870 a primeira patente americana de um aparato de dessalinização foi concedida ao trabalho de Wheeler e Evans. Praticamente todo o conhecimento atual sobre dessalinizadores solares e seus problemas de corrosão estão descritos nesta patente. O vapor pressurizado gerado pelo aparato de Wheeler e Evans

também criou energia para movimentar os acumuladores, de modo que “seguissem” o movimento do sol no céu.

Dois anos mais tarde, em 1872, o engenheiro sueco Carlos Wilson, projetou e construiu a primeira usina de dessalinização solar de grande escala, em Las Salinas no Chile. Este projeto foi criado com o fim de abastecer os trabalhadores de uma mina de salitre e seus familiares com água. A usina utilizava os efluentes da mina, extremamente salgados (140.000 ppm) para alimentar os destiladores. Ela produziu cerca de 22,7 m<sup>3</sup> de água potável por dia por mais de 40 anos e foi abandonada após a instalação de tubulações que transportam água das montanhas próximas.

O interesse por projetos de dessalinização em grande escala cresceu nos EUA nos anos 30-40 do século XX, impulsionado pela aridez e escassez de água na Califórnia, mas foi mitigado pela crise de 29. Durante a Segunda Guerra Mundial, a escassez de água enfrentada pelas tropas aliadas localizadas no norte da África e ilhas do Pacífico criou novo interesse no desenvolvimento destes projetos. Uma equipe do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), liderada por Maria Telkes e patrocinada pelo *U.S. National Research Defense Committee*, desenvolveu dessalinizadores para uso militar em alto mar que foram bastante utilizados pela marinha americana. As pesquisas da equipe de Maria Telkes se expandiram até 1956, investigando várias configurações diferentes de dessalinizadores, incluindo evaporadores de múltiplas utilizações (Kalogirou, 2009).

A explosão populacional e expansão da indústria após a Segunda Guerra trouxeram o problema do abastecimento da população com água doce de qualidade novamente a discussão. Em 1952 os Estados Unidos criaram o *Office of Saline Water (OSW)* para fomentar pesquisas sobre dessalinizadores. Como resultado desta iniciativa, cinco plantas de demonstração foram construídas em todo o país, entre elas a usina de dessalinização solar de Daytona Beach, Florida, onde vários tipos de evaporadores e configurações foram testados. Nos anos que seguiram, diversas usinas de destilação solar foram instaladas em ilhas do Caribe pela Universidade McGill do Canadá.

Trabalhos experimentais envolvendo este assunto também foram realizados na Índia pelo Laboratório Nacional de Física de Nova Delhi e pelo Instituto Central de Química Marinha e Sal de Bhavnagar. Na Austrália, a Organização de Pesquisa Industrial e da Comunidade Científica (CSIRO), de Melbourne, criou um protótipo que se tornou amplamente utilizado no deserto australiano para abastecer populações e rebanhos através de poços de água salina (Kalogirou, 2009).

Entre os anos de 1965 e 1970, usinas de destilação foram construídas em quatro ilhas gregas para abastecer pequenas comunidades com água fresca. Projetadas pela Universidade Técnica de Atenas, as capacidades das usinas

variavam entre 2044 e 8640 m<sup>3</sup>/dia, sendo a instalação da ilha de Patmos a maior já construída com este propósito.

Atualmente, grande parte das usinas de destilação solar apresentadas estão fora de operação e, ainda que as pesquisas envolvendo a utilização da energia solar continuem, nenhuma usina de grande capacidade foi construída nos últimos anos (Kalogirou, 2009).

### **4.3. SECAGEM**

Ainda outra aplicação da energia solar é a secagem de produtos agrícolas. Secadoras solares têm sido utilizadas principalmente na indústria agrícola. O objetivo em se secar produtos agrícolas é reduzir a umidade a um nível que permita a estocagem durante longos períodos sem a deterioração do produto. Secagem é um processo que envolve transferência de calor e de massa, calor da fonte quente para o produto agrícola e de massa, a umidade do interior do produto para sua superfície e então para o ar que o cerca. Durante muitos séculos, esse processo foi realizado ao ar livre, entretanto, secadoras solares são mais eficientes e vem ganhando visibilidade e espaço (Kalogirou, 2009).

A radiação solar pode ser a fonte principal de calor de uma secadora, ou somente suplementar o sistema. O aquecimento da colheita pode ser feito através da condução de ar quente e seco, exposição dos grãos ao sol ou uma combinação de ambos.

O processo físico da secagem é relativamente simples: aquece-se o produto a uma temperatura que não seria atingida em condições ambientes, aumentando, assim, a pressão de vapor da umidade nele contida e evaporando a umidade superficial, o que eleva a migração de água para a superfície, diminuindo sua umidade interna. Quando há circulação de ar, este é previamente aquecido também através da radiação solar, o que aumenta a pressão de vapor da umidade nele contida, melhorando sua capacidade de condução de umidade.

### **4.4. SOL COMO FONTE DE ENERGIA**

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, constitui atualmente uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios do novo milênio. Praticamente qualquer fonte de energia gerada na terra é em última instância derivada da energia do sol.

É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento, da radiação solar. As reações químicas às quais a matéria orgânica foi submetida, a altas temperaturas e pressões, por longos períodos de tempo, também utilizaram o Sol como fonte de energia. É também por causa da energia do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, é capaz de se desenvolver, fazer fotossíntese para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas.

A Terra recebe anualmente  $1,8 \times 10^{14}$  kWh de energia solar, o que corresponde a 7.500 vezes o consumo mundial de energia no mesmo período. Uma das possíveis formas de conversão de parte da energia solar é conseguida através do efeito fotovoltaico que ocorre em dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas. Estas células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores (KALOGIROU, 2009).

#### **4.4.1. POTENCIAL ENERGÉTICO MUNDIAL**

A energia dissipada pelo sol é a fonte de energia renovável mais abundante do nosso planeta e pode ser aproveitada de maneira direta, através da conversão da radiação que ele emite, ou indiretamente (energia eólica, biomassa, hidrelétrica, mares, etc).

O sol irradia energia a uma taxa média de  $3,8 \times 10^{23}$  kW, entretanto somente uma pequena porção,  $1,8 \times 10^{14}$  kW, é interceptada pelo nosso planeta. Toda energia que é direcionada para a Terra pode ter três destinos, ser devolvida ao espaço por conta de interações físicas que ocorrem nas camadas mais exteriores da atmosfera e na magnetosfera, ser absorvida pela atmosfera e aquecê-la ou irradiar sem obstáculos até a litosfera. As duas primeiras possibilidades desviam cerca de 40% da energia irradiada, sobrando 60% para a conversão em energia elétrica ou térmica ( $1,8 \times 10^{14}$  kW). Em um ano essa radiação equivale a 7500 vezes os 450 EJ de energia produzida pela humanidade, da qual 80% são provenientes de combustíveis fósseis e não renováveis, apesar dos vários riscos associados à sua utilização. (WORLD ENERGY COUNCIL, 2012).

#### **4.4.2. POTENCIAL ENERGÉTICO NACIONAL E DA REGIÃO SUL**

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em associação ao Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (EMC/UFSC), divulgou um levantamento da energia solar que irradia sobre o território brasileiro. Os dados divulgados são estimados a partir de dados de cobertura efetiva de nuvens obtidos com um satélite geoestacionário e das taxas de transmissão e reflexão desta radiação nas duas condições climáticas extremas, céu claro e coberto. Os dados utilizados para esta relação foram coletados entre 1995 e 1998.

Para se definir um único valor que seja representativo de toda a irradiação recebida pelo vasto território nacional, pode-se utilizar os dados do gráfico da figura 3, através de uma média ponderada relacionando a radiação média anual de cada região com a sua porcentagem da área do território total, obter o valor de 5506 Wh/m<sup>2</sup>.

A região sul do país, aonde predomina o clima subtropical e os invernos costumam contar com mais dias de tempo fechado, apresenta uma variação mais acentuada entre a irradiação mensal e também uma variabilidade diária maior nos meses de maio, junho, julho e agosto. No mesmo gráfico de onde extrai-se o valor médio anual para todo o país, encontra-se o valor anual médio da irradiação da região sul, cujo valor é de 5015 Wh/m<sup>2</sup>, cerca de 90% da radiação média anual. Vale ressaltar que um estudo mais elaborado, utilizando os valores médios mensais e as variações diárias, e não a aproximação média de uma região deve ser feito antes da instalação de um sistema de conversão de energia para garantir a sua viabilidade, retorno e eficiência.

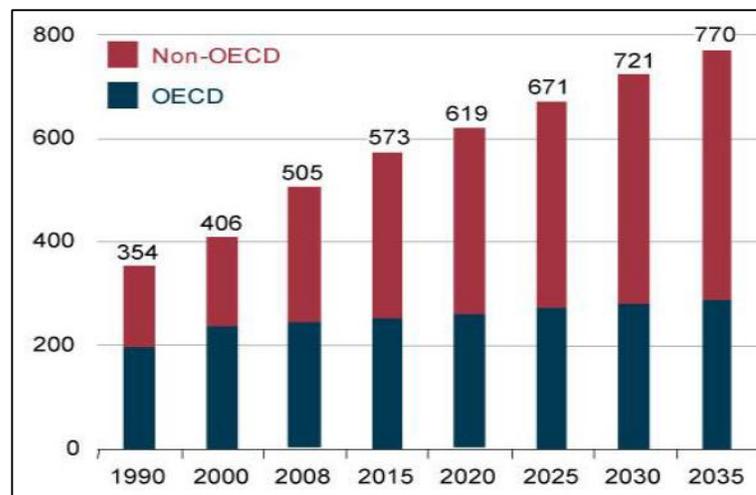
#### **4.4.3. PROJEÇÃO DO CONSUMO MUNDIAL**

O crescimento demográfico de uma nação costuma seguir uma tendência conhecida, sendo que uma nação em desenvolvimento ou emergente normalmente apresenta uma fase de crescimento quase constante, onde a universalização do saneamento básico e saúde impulsionam a taxa de natalidade e diminuem a de mortalidade, até um pico onde ocorre a estabilização dessa população e o seu eventual declínio, onde as taxas de natalidade e mortalidade se equivalem e a de natalidade se retrai, ocasionando a diminuição do número de indivíduos.

Apesar de a industrialização dos países considerados de '3º mundo' estar levando saneamento e saúde para populações antes não atendidas, a taxa de crescimento da população mundial ainda vale 1,17% ao ano, pois os

países que ainda não atingiram a estabilização de suas populações ainda são mais numerosos que os já estabilizados. O crescimento populacional já pode antever um aumento na demanda pela energia, entretanto, existe um fator talvez ainda mais importante para esta estimativa que é a industrialização dos países subdesenvolvidos e o aumento do poder de consumo de suas populações, que se aproximam cada vez mais dos padrões de consumo de países como Estados Unidos, Inglaterra, França e outros países com industrialização mais antiga.

Levando em consideração estes dois fatores, órgãos governamentais relacionados ao tema divulgam periodicamente suas previsões da demanda de energia elétrica. Um departamento ligado ao governo dos Estados Unidos, o *U.S. Energy Information Administration*, apresenta anualmente um relatório sobre a disponibilidade de energia no planeta e mantém estes dados disponíveis para consulta. De acordo com os dados disponíveis em seu site, o consumo mundial de energia no ano de 2025 será próximo a  $770 \times 10^{15}$  BTU, o equivalente a  $812 \times 10^{18}$  J (Gráfico 1).



**Gráfico 1 - Projeção do Consumo de Energia no Mundo, em  $10^{15}$  BTU**

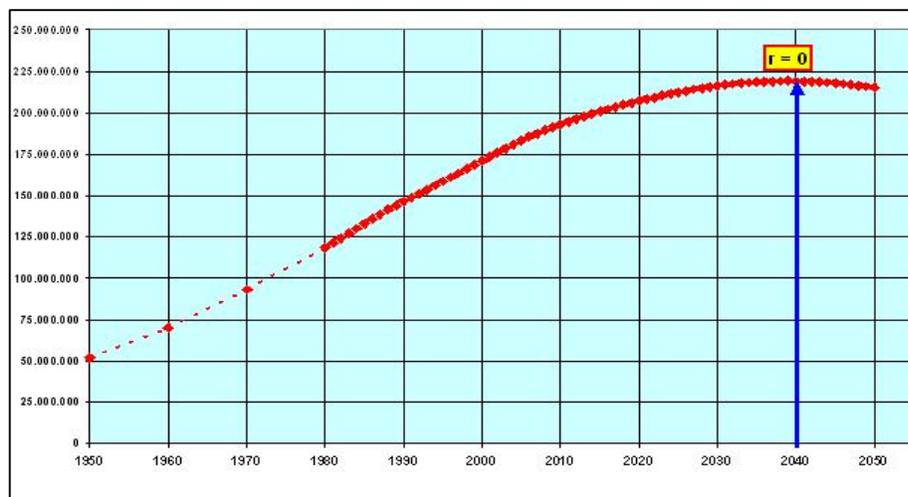
**Fonte: U.S. Energy Information Administration, 2012.**

De acordo com a mesma fonte, a produção total de energia no planeta no ano de 2009 foi de  $510 \times 10^{18}$  J. Caso a tendência utilizada para gerar estes dados se mantenha e estes valores se tornem realidade, em cerca de 25 anos será preciso quase dobrar a geração de energia para poder manter o atual nível de industrialização e consumo. Para evitar este cenário de extrema escassez, é necessária uma reforma radical na matriz energética mundial nas próximas décadas. (*U.S. Energy Information Administration, 2012*)

#### 4.4.4. PROJEÇÃO DO CONSUMO NACIONAL

No Brasil a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), presta ao governo o serviço de quantificar a demanda e a produção de energia separando-a por fonte. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2012, que leva em conta dados do ano de 2011, 74% da matriz energética brasileira era de fonte hidráulica, e os outros 26% divididos entre fontes fósseis e fontes renováveis. O mesmo relatório informa que a energia total produzida pelo país chegou a  $1,64 \times 10^{18}$  J, e a análise de consumo por setor mostra que o consumo residencial, consumiu o equivalente a  $23,669 \times 10^3$  toneladas equivalentes de petróleo. De acordo com o Conselho Mundial de Energia, uma tonelada equivalente de petróleo vale  $42 \times 10^9$  J, e assim o consumo nacional de energia elétrica para uso residencial no ano de 2010 valeu  $9,94 \times 10^{14}$  J, uma grande quantidade de energia, mas uma parcela relativamente pequena do consumo total de energia do país naquele ano.

O Ministério de Minas e Energia – MME em seu Plano Nacional de Energia 2030 prevê um crescimento anual de 4% entre os anos de 2005 e 2030, alcançando em 2030 um consumo final de 1.056.796 GWh ou  $3,80 \times 10^{18}$  J, mais do que o dobro da energia consumida atualmente. Assim como foi constatado durante a análise da oferta e demanda de energia no planeta, caso a taxa de crescimento do consumo e da população brasileira se mantenha (Gráfico 2), será necessária uma completa reestruturação da matriz energética brasileira nas próximas duas décadas para evitar o cenário caótico de uma crise energética.



**Gráfico 2 - Previsão do Crescimento Populacional do Brasil**

**Fonte: IBGE, 2008.**

## 4.5. VARIAÇÕES NA RADIAÇÃO SOLAR

Apesar de a radiação incidente no topo da atmosfera terrestre ser relativamente constante e uniforme, a radiação solar que atinge a superfície da Terra varia em função de diversos fatores. Entre eles destacam-se:

- Efeitos atmosféricos, como absorção e espalhamento;
- Variações locais da atmosfera, como vapor de água, presença de nuvens e poluição;
- Posição no globo, predominantemente latitude;
- Período do ano e do dia;

Os efeitos acima listados impactam a incidência da radiação solar de diversas maneiras, como a diminuição da intensidade e potência recebida, alteração da composição espectral da luz e o ângulo de incidência da mesma.

### 4.5.1. EFEITOS ATMOSFÉRICOS

Os principais efeitos atmosféricos na captação de energia da radiação solar para fins de aproveitamento térmico ou fotovoltaicos são:

- A redução da energia transmitida pela radiação solar, devido a absorção, espalhamento e reflexão pela atmosfera;
- Alteração na composição espectral da radiação pela absorção preferencial de determinadas frequências e comprimentos de onda;
- Adição de uma componente difusa e indireta na radiação solar;
- Efeitos derivados de variações locais na atmosfera, que tem efeito adicional nas alterações supracitadas (PVCDROM, 2012).

### 4.5.2. ABSORÇÃO NA ATMOSFERA

Ao atravessar a atmosfera, parte da radiação solar interage e é absorvida por gases, aerossóis e poeira. Certos gases, notavelmente o ozônio ( $O_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o vapor de água ( $H_2O$ ), tem alta absorção de fótons com comprimentos de onda próximos do valor de energia das suas ligações moleculares. Grande parte da radiação infravermelha acima de  $2 \mu m$  é absorvida pelo vapor de água e dióxido de carbono, enquanto a maior parte da radiação de  $0,3 \mu m$  é absorvida pelo ozônio. Essa absorção tem efeito bastante profundo na curva do espectro da radiação, na forma de depressões na intensidade de determinado comprimento de onda. Enquanto a absorção de fótons por gases específicos na atmosfera tem grande influência na composição espectral da radiação solar, seu efeito na intensidade e energia transportada é relativamente desprezível. A perda de energia do espectro de

radiação se dá, principalmente, pela absorção da luz por moléculas de ar e poeira. Essa absorção não causa depressões no espectro da luz, como a absorção por CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. A redução de energia neste caso é função do percurso da luz na atmosfera, e não de comprimentos de onda específicos. Quando o sol se encontra no zênite, a absorção de energia por esses elementos é relativamente uniforme no espectro e a luz incidente na superfície terrestre é “branca”. No início da manhã e ao anoitecer, a luz segue um percurso maior, onde a radiação em comprimentos de onda menores é mais eficientemente espalhada e absorvida, motivo pelo qual a radiação solar nestes períodos tem aparência avermelhada e menos intensa. (PVCDROM, 2012)

### **4.5.3. RADIAÇÃO DIRETA E DIFUSA**

A radiação solar ao interagir com a atmosfera é absorvida ao mesmo tempo em que é espalhada em diferentes frequências. Os dois principais mecanismos pelos quais a radiação solar sofre espalhamento são conhecidos como “dispersão de Rayleigh” e “dispersão de Mie”.

O espalhamento de Rayleigh ocorre também quando a luz viaja por meios sólidos e líquidos, mas é principalmente observável em meios gasosos. Se o tamanho das partículas do meio pelo qual a radiação se move é maior que o comprimento de onda da mesma, a luz não se decompõe em suas componentes cromáticas e todos os comprimentos de onda são igualmente dispersados. Para que a luz seja dispersa, o tamanho das partículas deve ser similar ou menor que o comprimento de onda (PHYSICAL GEOGRAPHY, 2015).

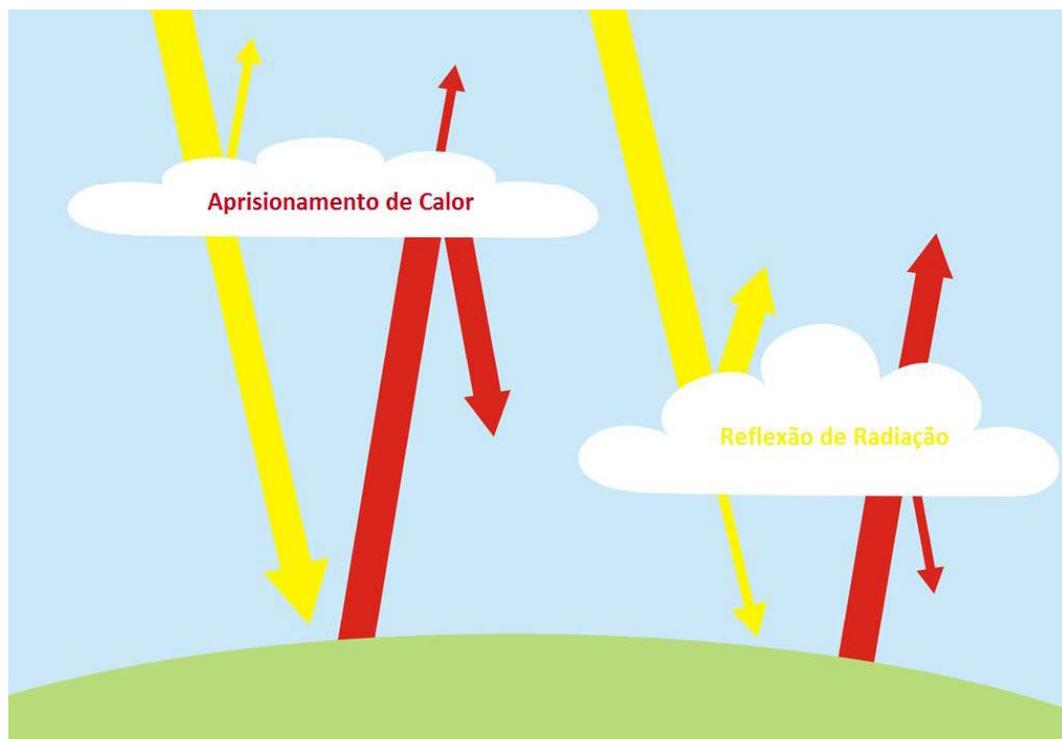
Uma vez que a dispersão de Rayleigh tem limitações e só é aplicável à parte do espectro eletromagnético e das partículas que compõem a atmosfera, o espalhamento de Mie é utilizado complementarmente para o estudo do padrão de espalhamento por aerossóis e partículas de poeira suspensas.

A luz dispersa é indireta e parece ser proveniente de qualquer, ou toda, região do céu, e recebe o nome de “luz difusa”. Uma vez que a luz difusa é, principalmente, azul, todas as regiões do céu parecem emitir luz nessa coloração. Em um dia claro e de céu limpo, aproximadamente 10% da radiação total incidente sobre a superfície é difusa (PHYSICAL GEOGRAPHY, 2015).

### **4.5.4. VARIAÇÕES LOCAIS DA ATMOSFERA**

A última influência, e mais dificilmente determinável, da atmosfera sobre a radiação solar se deve as variações locais da atmosfera, principalmente a cobertura de nuvens (Figura 3).

A refletância média da atmosfera, o chamado “albedo”, é de aproximadamente 30%, ou seja, 70% da radiação solar penetram a atmosfera e o albedo retorna ao espaço. Caso as nuvens fossem removidas desse cálculo, o albedo diminuiria em cerca de 15% a quantidade de energia de ondas curtas que atingiriam e aqueceriam a superfície do planeta aumentaria de 239 W/m<sup>2</sup> para 288 W/m<sup>2</sup>. Entretanto, essas mesmas nuvens impedem que radiação em ondas longas (vermelho e infravermelho) seja refletida pela superfície do planeta e devolvida ao espaço. Essa reflexão hoje tem o valor de 234 W/m<sup>2</sup> e estima-se que na ausência de nuvens este valor aumentaria para 266 W/m<sup>2</sup>. Considerando-se o aumento de radiação em ondas curtas e o contraponto da perda de calor em ondas longas, a presença das nuvens na atmosfera evita um aumento de 17 W/m<sup>2</sup>. Assim, a cobertura global de nuvens tem um efeito arrefecedor no planeta (PHYSICAL GEOGRAPHY, 2015).



**Figura 3 - Cobertura de nuvens**

**Fonte: PHYSICAL GEOGRAPHY, 2015.**

Nuvens de baixas altitudes tendem a promover o efeito arrefecedor supracitado. Adicionalmente, essas nuvens têm maior espessura e refletem grande parte da radiação de ondas curtas incidente. Além disso, por conta de sua baixa altitude, essas nuvens têm maior temperatura e emitem radiação em ondas longas para as camadas mais altas da atmosfera e o espaço.

Reciprocamente, nuvens de grandes altitudes têm efeito contrário. Por conta de sua elevação, essas nuvens emitem uma quantidade bastante baixa de radiação de ondas longas para o espaço e sua configuração de pouca espessura oferece pouca resistência à radiação solar, refletindo apenas uma pequena fração da luz incidente.

#### 4.5.5. MASSA DE AR

Massa de Ar refere-se ao aumento do trajeto que a luz precisa fazer através da atmosfera com relação ao trajeto mais curto possível, quando o sol se encontra no zênite (Figura 6). Através da massa de Ar, calcula-se a redução da intensidade luminosa pela intensificação da interação da radiação com os gases e partículas da atmosfera, como previamente exposto.

O valor da Massa de Ar é calculado através da seguinte fórmula:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

Onde,

$\Theta$  – Ângulo zenital;

AM – Massa de Ar;

Quando o sol se encontra no seu ponto mais alto, a Massa de Ar assume o valor 1.

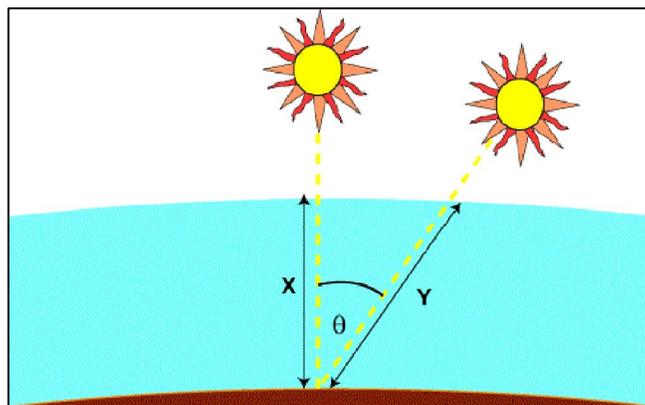
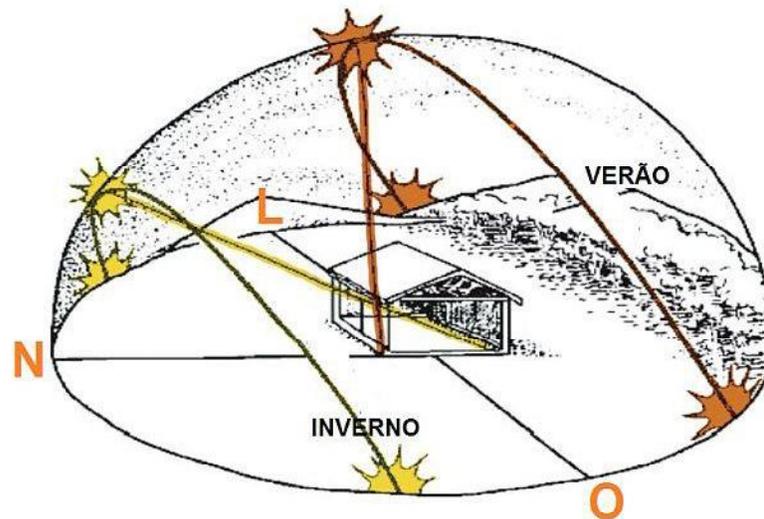


Figura 4 - Massa de ar

Fonte: PVCDROM, 2012.

#### 4.5.6. MOVIMENTO DO SOL

O movimento aparente do sol, causado pela rotação da Terra em torno do seu eixo, muda o ângulo com o qual a componente direta da radiação atinge a superfície da Terra. A posição do sol no céu varia com a posição do observador na Terra, o período do dia e do ano em que se faz a observação, como representada na figura 5:



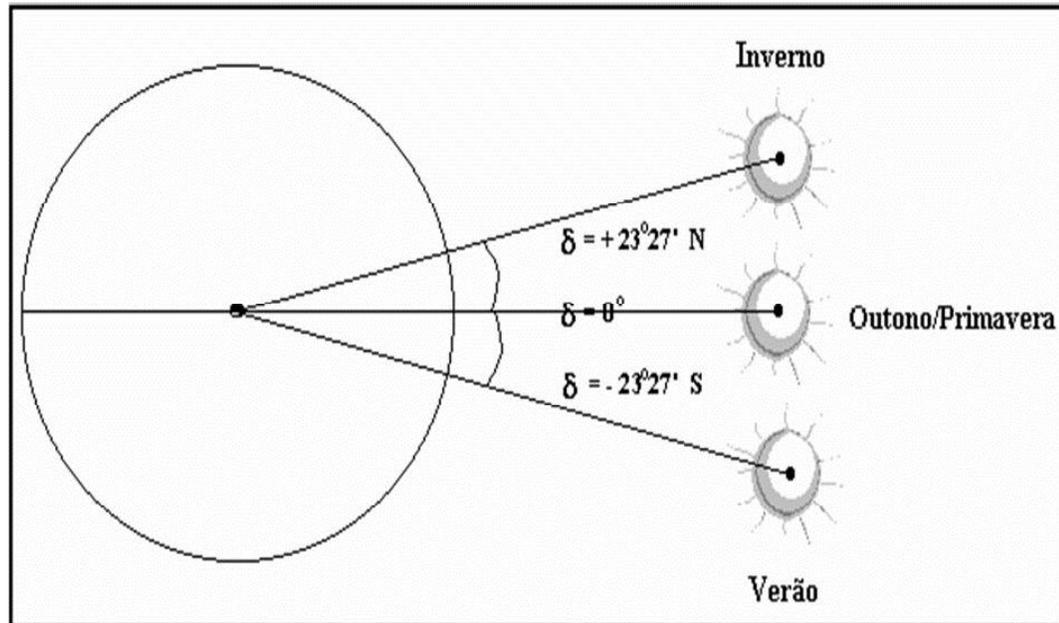
**Figura 5 - Caminho do sol**

**Fonte: PORTAL SOLAR, 2012.**

A posição relativa do sol à posição do observador, ou possível coletor solar, tem enorme impacto na energia recebida. Em uma situação em que os raios solares são perpendiculares à superfície do coletor, a potência recebida, ou “densidade de energia”, será igual à potência irradiada. Entretanto, ao se alterar o ângulo com o qual esses raios solares atingem a superfície coletora, por movimento do sol ou do coletor, a intensidade da radiação é reduzida. Em tal situação, a potência recebida pelo coletor será dependente do produto interno entre o vetor radiação solar e o vetor normal ao plano coletor. O produto interno entre dois vetores é função do cosseno do ângulo formado por tais vetores, e pelas intensidades dos mesmos. Assim, a radiação solar que incide sobre um plano coletor com inclinação de  $60^\circ$ , transporta até esta metade da radiação que seria transportada caso a incidência fosse perpendicular (PORTAL SOLAR, 2015).

#### 4.5.7. DECLINAÇÃO SOLAR

A declinação do sol é o ângulo entre o equador e uma linha entre o centro da Terra e o centro do Sol. O ângulo de declinação se deve ao ângulo do eixo de rotação da Terra com relação ao eixo de translação e a sua variação sazonal é ilustrada na figura 8:



11

Figura 6 - Declinação solar

Fonte: GALVANI, 2015.

O ângulo de declinação é representado pela letra grega delta ( $\delta$ ) e é calculável para cada dia do ano pela seguinte equação 2:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (d - 81)\right) \quad (2)$$

Onde:

d = dia do ano, com 01/jan= 1.

A declinação, medida com relação ao equador, é zero nos equinócios (22 de Março e Setembro), positiva durante o verão do hemisfério norte e negativa

no verão do hemisfério sul. O valor máximo da declinação solar equivale à inclinação do eixo de rotação da Terra com relação ao seu plano de translação,  $23,45^\circ$ , e ocorre durante os solstícios (22 de Junho e Dezembro) (GALVANI, 2015).

#### 4.5.8. ÂNGULO DE ELEVAÇÃO

O ângulo de elevação (Figura 9), também conhecido como ângulo de altitude, é a altura angular do sol no céu, medida a partir da horizontal. Ao amanhecer, o sol se encontra no horizonte, em uma altura angular próxima a  $0^\circ$ . Ao meio dia solar, e no equinócio no equador, o ângulo de elevação do sol é de  $90^\circ$ .

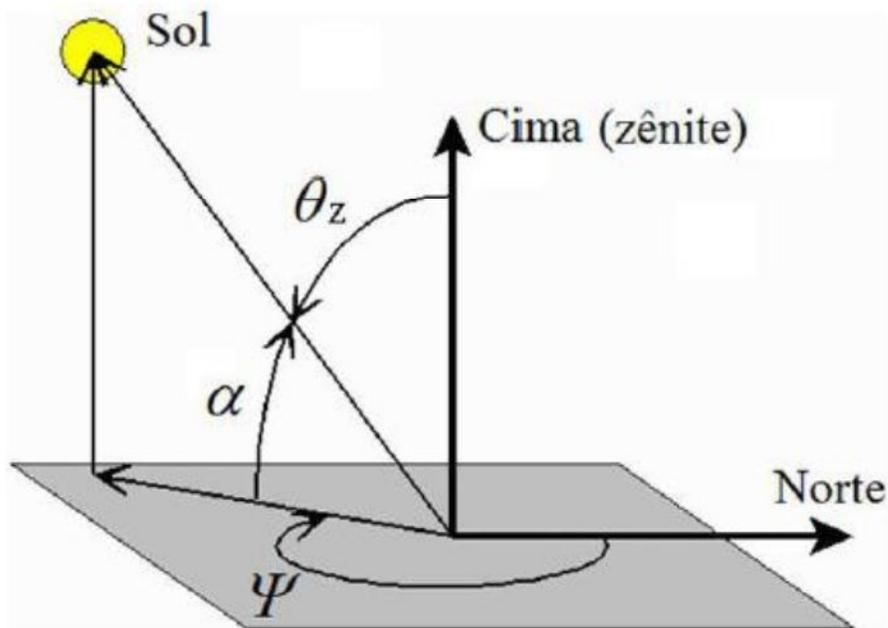


Figura 7 - Ângulo de elevação solar

Fonte: CAMPOS, 2015.

Ajustando-se estes valores com a declinação solar e latitude, é possível calcular o ângulo de elevação para qualquer período do ano e qualquer região do planeta:

$$\alpha = 90 - \theta + \delta \text{ (hemisfério norte)} \quad (3)$$

$$\alpha = 90 + \theta - \delta \text{ (hemisfério sul)} \quad (4)$$

Onde:

$\alpha$  - Elevação solar

$\theta$  – latitude;

$\delta$  – declinação solar;

#### 4.5.9. HORA SOLAR E ÂNGULO AZIMUTAL

A Terra completa uma volta em torno do seu próprio eixo aproximadamente a cada 24 horas, um ritmo  $15^\circ$  por hora. Convencionando que o sol ao meio dia solar, no zênite, está em  $0^\circ$ , a cada hora que se passa ou que atrasa, o sol anda  $15^\circ$  para oeste ou leste, respectivamente. O ângulo relativo à Hora Solar pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$LT = 0^\circ \pm 15^\circ \cdot \Delta T \quad (5)$$

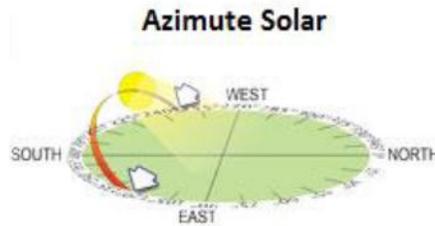
Onde:

LT – Local Time, nomenclatura usual para a Hora Solar.

$\Delta T$  – Quantidades de horas antes ou após o meio dia solar.

A segunda parcela da fórmula assumirá valores positivos após o meio dia solar e negativos antes.

O Ângulo Azimutal é a direção a partir da qual a luz solar direta atinge a superfície. Ao meio dia solar, o sol sempre está diretamente ao norte no hemisfério sul e ao sul no hemisfério norte. Entretanto, o sol sempre nasce à leste e se põem à oeste. Deste modo, o movimento do sol durante do dia é de um arco Leste-Norte/Sul-Oeste, como mostra a figura “Caminho do Sol” e a figura 8:



**Figura 8 - Ângulo azimutal**

**Fonte: Autoria Própria.**

O arco no qual o sol descreve o Ângulo Azimutal varia durante o ano, sendo o seu zênite sempre determinado pela declinação solar. Assim como acima descrito, esta variação tem efeito direto e de grande importância na potência que pode ser aproveitada da radiação solar através da orientação das superfícies coletoras.

O ângulo azimutal pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$A_z = \cos^{-1} \left( \frac{\sin(\delta) \cdot \cos(\theta) - \cos(\delta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(LT)}{\cos(\alpha)} \right) \quad (6)$$

Onde:

$A_z$  – ângulo azimutal;

$\delta$  – declinação solar;

LT – hora solar;

$\theta$  – latitude do local;

$\alpha$  – ângulo de elevação;

Conhecidos os valores médios e históricos de radiação e o ângulo azimutal, é possível calcular os valores máximos e mínimos de incidência solar para determinada região, bem como a variação mensal, semanal ou até mesmo diária, imprescindíveis para o dimensionamento correto e otimizado de um sistema de captação de energia solar, térmico ou fotovoltaico (PVCDROM, 2012).

#### **4.6. RADIAÇÃO ANUAL NO BRASIL**

O acordo entre os governos brasileiro e alemão em 2008, que trata sobre a cooperação no setor de energia com foco em energias renováveis, bem como o anúncio da vinda para o Brasil da gigante chinesa BYD Auto, do ramo de carros e ônibus elétricos, baterias, redes inteligentes e painéis fotovoltaicos, prometem acelerar o desenvolvimento e difusão da energia solar no país (CARTA MAIOR, 2015).

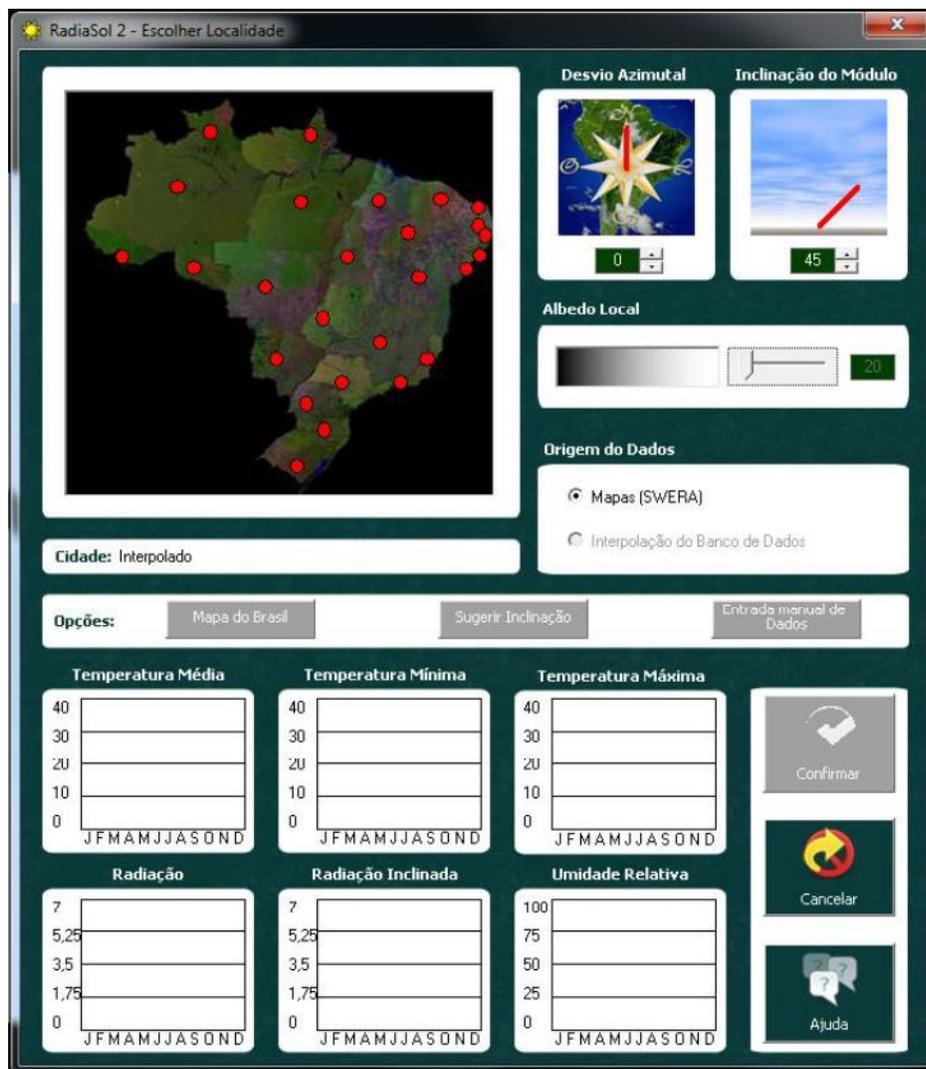
O Brasil se encontra em uma situação bastante confortável no cenário energético por dispor de um imenso potencial e também das matérias primas para confecção dos sistemas coletores em grande quantidade.

O Brasil possui as maiores jazidas de quartzo acumuladas e está detém a tecnologia para a montagem de células solares, porém importa o silício purificado, encarecendo o custo dos painéis solares. Nós também somos um dos maiores produtores e exportadores de silício metalúrgico, produzido a partir do quartzo, mas que tem um índice de pureza muito baixo. Após a purificação nos Estados Unidos, Europa e China, o silício é comprado de volta a um preço maior, afirma o físico e professor da Unicamp, Francisco das Chagas Marques, do Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas (CARTA MAIOR, 2015). Esse encarecimento, naturalmente, dificulta e por vezes inviabiliza a difusão dessa tecnologia no país. Entretanto, a Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica (ABSOLAR) calcula que para cada 1 MW instalado por geração fotovoltaica, são criados 20 empregos. Significa que se o Brasil instalasse mil MW por ano seriam criados 20 mil empregos. Atualmente, o setor de energias alternativas, que inclui energia eólica, maremotriz, biomassa, entre outras, emprega 7,7 milhões de pessoas no mundo. O investimento nessa área cria benefícios ambientais, econômicos e sociais, tanto no longo prazo quanto no médio e curto. O Brasil também é privilegiado com abundante radiação solar, com aproximadamente 280 dias com sol ao ano e radiação em intensidade maior do que qualquer país temperado. Comparativamente, a Alemanha, um dos países onde a energia solar foi melhor difundida e que gerou 32% da energia solar mundial, recebe em média 1.300 kWh/m<sup>2</sup> por ano, enquanto o Brasil apresenta valores mínimos de 1.642 kWh/m<sup>2</sup>. Essa comparação indica que ainda nas regiões com menor intensidade de radiação no Brasil, a energia solar permanece uma alternativa bastante atraente e viável (CARTA MAIOR, 2015).

#### **4.7. ANÁLISE COMPUTACIONAL**

Como previamente exposto, o cálculo da posição do sol durante o ano e a radiação incidente é tão importante para o projeto de um sistema quanto trabalhoso. O software Radiasol 2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar – Labsolar, da escola de engenharia da Universidade Federal do Rio

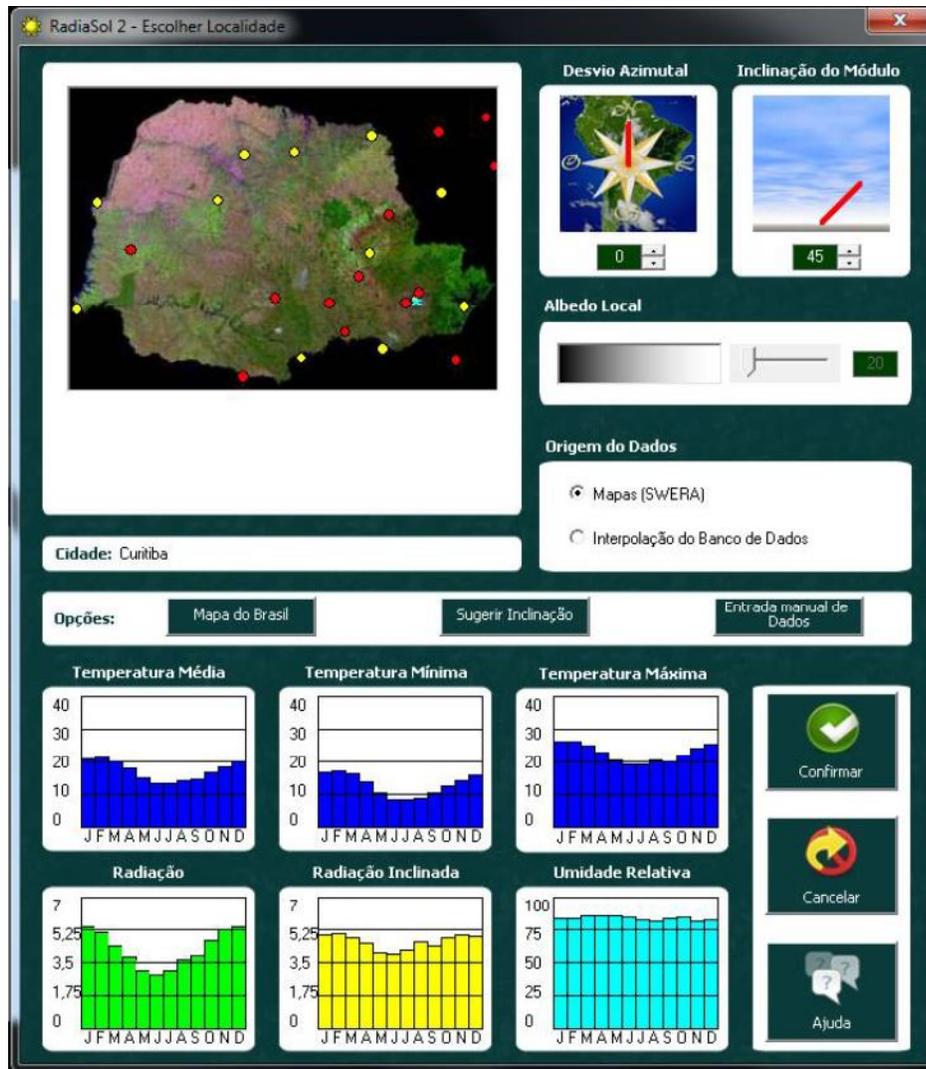
Grande do Sul (UFRGS), automatiza a mesma rotina de cálculo apresentada ao mesmo tempo que relaciona valores históricos de radiação em uma grande quantidade de cidades brasileiras. Este software é uma das alternativas gratuitas e confiáveis para facilitar o projeto e torna-lo mais acurado para cada região.



**Figura 9 - Tela inicial RadiaSol2**

**Fonte:** Laboratório de energia solar da UFRGS.

Na tela inicial do programa (Figura 9), inserem-se as informações relativas à posição do coletor solar no globo e também seu desvio azimutal e inclinação relativa ao zênite.



**Figura 10 - Entrada de dados**

**Fonte:** Laboratório de energia solar da UFRGS.

Neste exemplo, foi selecionada a cidade de Curitiba no Paraná. Antes da confirmação dos dados inseridos, algumas informações relativas ao local selecionado são apresentadas. A radiação direta, inclinada, temperaturas e umidade relativa são estimadas através de registros históricos da região (Figura 11).



Figura 11 - Variação horária da radiação inclinada em Curitiba/PR

Fonte: Laboratório de energia solar da UFRGS.

Quando da confirmação da entrada de dados, a tela acima é apresentada com a variação horária da radiação inclinada na região selecionada. É possível escolher quais componentes da radiação solar deseja-se analisar, variando com a necessidade de cada projeto com a facilidade de análise visual que se deseja.

## **5. LAGOAS SOLARES**

Lagoas solares são, em sua descrição mais básica, grandes depósitos de água aonde a perda de energia é “interrompida” de maneira a aprisionar e armazenar. Em lagoas naturais, cerca de 30% da radiação incidente atinge uma profundidade de 2 metros, aquecendo assim o solo do fundo. Este calor é rapidamente transmitido por condução para as águas em contato com o fundo, que se tornam menos densas e conseqüentemente emergem. Em contato com o ar atmosférico elas perdem o calor recebido através da evaporação e movimento convectivo do ar, motivo pelo qual estas lagoas naturais raramente atingem temperaturas superiores às ambientais.

A água apresenta uma condutividade térmica de valor bastante reduzido, sendo a convecção o principal mecanismo de transporte de calor no fluido. Através de diversos métodos a perda de calor por convecção é mitigada, reduzindo drasticamente o calor transportado para a superfície e aprisionando grandes quantidades de energia nas regiões profundas destes lagos.

Existem duas principais categorias de lagoas solares, as convectivas e as não convectivas. Lagoas não convectivas reduzem a troca de calor entre o fundo da lagoa e a superfície, impedindo a formação de correntes de convecção no corpo d’água, enquanto lagoas convectivas permitem a movimentação das águas de diferentes densidades, mas bloqueia a troca de calor entre as águas superficiais e a atmosfera.

### **5.1. TIPOS DE LAGOAS**

#### **5.1.1. CONVECTIVAS**

Lagoas solares convectivas, como sugere o nome, são aquelas em que o fluxo de convecção não é afetado para promover o armazenamento de calor na lagoa, mas nas quais a troca de calor do fluido com a atmosfera é impedida por algum tipo de isolamento. A lagoa solar convectiva mais bem estudada, e que também apresenta um projeto bastante simples, é a “Lagoa solar pouco profunda” (Shallow solar pond). Esta lagoa consiste em água pura confinada em uma espécie de “saco” que permite a convecção, mas impede completamente a evaporação. Este “saco” tem seu lado inferior em uma coloração escura, que maximiza a absorção de radiação solar, e um sistema de isolamento térmico. Uma segunda camada de isolamento no seu lado superior ajuda a minimizar as perdas de energia para a atmosfera.

### 5.1.2. NÃO CONVECTIVAS

A convecção da água é reduzida nas lagoas não convectivas através de 2 princípios, a segregação das lagoas em regiões de diferentes gradientes de salinidade e a utilização de barreiras físicas.

Lagoas solares de “gradiente de salinidade” (Salt Gradient Solar Ponds) são as lagoas mais simples do ponto de vista técnico, baratas e de instalação mais difundida. Através da adição de cloreto de sódio ou magnésio em diferentes concentrações na lagoa, são criadas regiões de diferentes salinidades, e conseqüentemente diferentes densidades. Ainda que a radiação solar eleve a temperaturas da camada inferior e com isso sua densidade diminua, a grande concentração de sais se contrapõe à diminuição de densidade, de maneira que não haja movimento vertical de água (HAJ KHALIL, 1997).

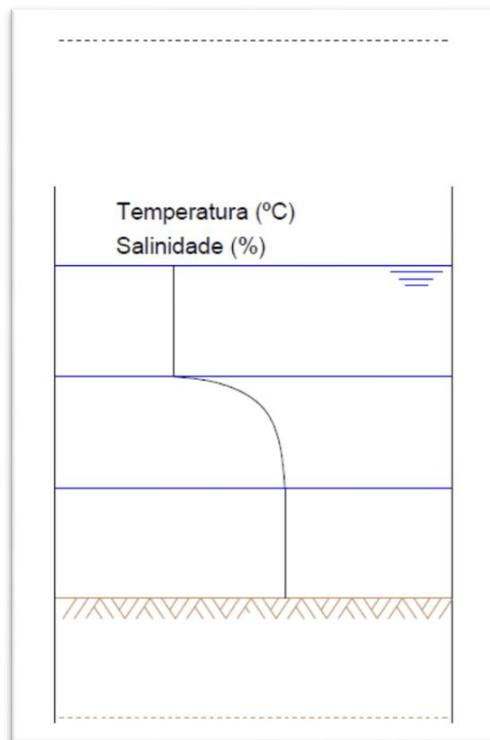
Lagoas não convectivas que operam com auxílio de barreiras físicas utilizam membranas ou géis para evitar a mistura de águas rasas e profundas. As membranas utilizadas neste tipo de coletor são formadas de polímeros transparentes e estruturadas num padrão semelhante a favos de mel. Esta geometria aprisiona bolhas de ar que permitem a passagem da radiação solar mas impedem a passagem da água no seu movimento de convecção. Um gel pode desempenhar a mesma função que estas membranas na segregação da lagoa, contanto que permita a propagação de grande parte da radiação solar recebida e sua estrutura seja estável o suficiente para garantir a estabilidade das camadas. Um material bastante utilizado em lagoas deste tipo é o gel de poliacrilamida articulado em lagoas solares (HAJ KHALIL, 1997).

#### 5.1.2.1. LAGOAS SOLARES DE GRADIENTE SALINO

Lagoas solares de gradientes salinos são as mais difundidas e amplamente utilizadas por conta da sua simplicidade de instalação, manutenção e operação e custo relativamente baixo.

Lagoas solares de gradiente salino não foram inventadas, mas sim descobertas. Lagoas solares de ocorrência natural são encontradas em várias regiões do globo. A ocorrência de lagoas naturais de gradiente salino foi primeiramente documentada por Von Kalecsinsky em 1902 em Medve Lagoon, Transilvânia. A lixiviação de sais criou salmoura de grande concentração no fundo da lagoa, enquanto a água de precipitações formou uma camada de água fresca sobre a salmoura que permanecia em temperatura próxima da ambiente enquanto a temperatura da camada salgada era muito mais elevada (HAUSNKINS, 1987).

As primeiras aplicações do gradiente salino não estavam relacionadas à energia, sendo utilizado para manter a temperatura de tanques de piscicultura e evitar a morte de peixes durante o inverno e controlar a formação de cristais durante processos de mineração (UTEP, 2015). A primeira menção de lagoas solares artificiais foi feita em 1948 por Kalecsinsky, sugerindo a simulação artificial das lagoas solares naturais com salmoura e água fresca para a produção de energia. O desenvolvimento dessa tecnologia não avançou até 1970 por conta da abundância de combustíveis fósseis a preços bastante reduzidos.



**Figura 12 - Corte transversal de uma lagoa solar de gradiente salino**

**Fonte:** Autoria própria.

Como indicado na figura acima, a temperatura e a salinidade aumentam com a profundidade na zona intermediária (NCZ) e se mantêm constantes nas regiões superficial e profunda. As siglas UCZ, NCZ e LCZ representam, respectivamente, “Região convectiva superior” (*Upper Convecting Zone*), “Região não-convectiva” (*Non-Convecting Zone*) e “Região convectiva inferior” (*Lower Convecting Zone*).

- Região convectiva superior (UCZ). Esta região, que costuma ter cerca de 30 cm de profundidade, apresenta salinidade constante e bastante reduzida e temperaturas bastante próximas às ambientais.
- Região não convectiva (NCZ). Nesta região a salinidade e a temperatura aumentam com a profundidade, inibindo a formação de correntes de convecção. O gradiente de temperatura é formado por conta da absorção de radiação pela base da lagoa.
- Região convectiva inferior (LCZ). Esta zona apresenta uma salinidade quase constante e relativamente elevada (cerca de 30% em massa) e temperaturas bastante elevadas. O calor absorvido pela base da lagoa é armazenado nesta região. Quanto maior a espessura desta camada, maior a capacidade de armazenamento de calor e menores as flutuações de anuais de temperatura. Profundidades maiores, entretanto, aumentam o investimento inicial necessário e o tempo de instalação destes sistemas (HAJ KHALIL, 1997).

## **5.2. APLICAÇÕES DAS LAGOAS SOLARES**

Lagoas solares podem ser utilizadas como fontes de energia em diversas aplicações diferentes. Pequenas lagoas podem ser utilizadas para o aquecimento ou arrefecimento doméstico, aquecimento de piscinas ou estufas. Lagoas de maiores dimensões podem ser utilizadas para a produção de energia eléctrica através de ciclos de Rankine, dessalinização ou ainda em processos industriais que necessitem de baixas temperaturas, secagem ou pré-aquecimento.

Nos últimos quarenta anos mais de sessenta lagoas solares em escala industrial foram construídas no mundo, sendo a maior delas a de Beit Ha'Arava em Israel que conta com 250.000 m<sup>2</sup> de área de captação para gerar uma potência de pico de 5 MW. A Argentina tem utilizado lagoas solares nos processos de mineração e refinação de sulfato de sódio na região dos Andes, os Estados Unidos utilizam lagoas solares para aquecimento de piscinas em Miamisburg, Ohio (SRINIVASAN, 1993), e para geração de energia e dessalinização em El Paso, Texas e Arizona (HAUSKINS, 1987) A Índia iniciou a sua experiência com lagoas solares nos anos 70 com pequenas unidades experimentais próximas a centrais produtoras de sal. Em 1985 uma lagoa de 6.000 m<sup>2</sup> foi concluída em Bhuj para fornecer água aquecida para uma fazenda leiteira. Até o fim de 1988 outros 6.000 m<sup>2</sup> de coletores foram instalados para a produção de energia e dessalinização em Pondicherry (KUMAR, 1999).

A principal limitação das lagoas solares para aplicações industriais é o fato de que a temperatura na camada de armazenamento não ultrapassa os 95°C, enquanto grande parte dos processos industriais requerem temperaturas

superiores à 100°C em seus processos. Lagoas solares são capazes de atingir temperaturas superiores aos 100°C em sua camada convectiva inferior, tendo sido registrados valores de 106°C em El Paso e 113°C em Israel. Quando uma lagoa solar atinge tais temperaturas, e conseqüentemente entra em ebulição, a formação e deslocamento de bolhas de vapor causam a perturbação do gradiente de salinidade da lagoa e a água se torna turva, sendo necessária a imediata retirada de calor até a LCZ se reestabelecer (ALENEZI, 2012).

A viabilidade da instalação de lagoas solares em associação à um sistema de bombeamento de calor para geração de vapor, porém sem sucesso. Caso esta união fosse bem-sucedida e economicamente viável, um novo leque de aplicações para lagoas solares se tornaria viável (SRINIVASAN, 1993).

### **5.3. RETIRADA DO CALOR ÚTIL**

O calor útil pode ser retirado da lagoa utilizando trocadores de calor internos ou externos. Trocadores de calor internos ficam imersos na zona de armazenamento de calor, LCZ, e conduzem água fria que aquece retirando energia térmica da lagoa. Tais trocadores são feitos de cobre ou plástico para eliminar os efeitos da corrosão, bastante intensos em um ambiente agressivo como a salmoura aquecida. A lagoa solar de Gray Mountain no Arizona, posteriormente apresentada neste trabalho, utilizou um sistema de troca de calor interno a lagoa, constituído por tubos de fibra de vidro de duas polegadas de diâmetro enterrados sob a LCZ. (HAUSKINS, 1987). Em lagoas de tamanhos superiores a mil metros quadrados, a extração de calor é mais vantajosa em trocadores exteriores a lagoa. A grande quantidade de fluido necessária para a extração de energia em maior quantidade torna trocadores industriais mais convenientes. Esses trocadores costumam ser construídos em aço inoxidável. Entretanto, a condução de salmoura aquecida apresenta várias dificuldades. A alta corrosividade do fluido conduzido torna necessária a utilização de tubulação em materiais especiais, o que eleva o custo do projeto. Outra dificuldade do manuseio de salmoura é a deposição ou incrustação de sais quando da extração de calor, limitando os modelos de trocador de calor que mantém sua eficiência e integridade quando em operação. O tipo de trocador de calor mais indicado para este tipo de sistema é o Casca e Tubo. Esse trocador foi aplicado na lagoa solar de Kutch, também posteriormente apresentada neste trabalho (KUMAR, 1999).

### **5.4. EFICIÊNCIA MÁXIMA TEÓRICA**

As temperaturas de uma lagoa solar, exceto situações ótimas de posicionamento geográfico e radiação, não costumam exceder 75-82 °C. Comparando esses valores com uma média ambiental de 20°C e se baseando na segunda lei da termodinâmica e no ciclo de Carnot, é possível calcular a

eficiência máxima teórica de uma lagoa não convectiva de gradiente salino. Do ciclo de Carnot sabemos que o rendimento máximo de uma máquina térmica é (IF-UFRGS, 2015):

$$\eta = 1 - \frac{T_q}{T_f} \quad (7)$$

Onde:

$\eta$  – Rendimento;

$T_q$  – Temperatura da fonte quente;

$T_f$  – Temperatura da fonte fria;

Aplicando os valores usuais de funcionamento de uma lagoa solar, obtemos seu rendimento:

$$\eta = 1 - \frac{273 + 82}{273 + 20} = 21,1\%$$

Embora a comparação de coletores solares com máquinas e equipamentos que utilizem fontes de energia fóssil, como motores de combustão e termelétricas, seja inválida pela própria natureza das fontes de energia de ambos os mecanismos, autores como Walker (2001) utilizam essa comparação com fim ilustrativo. Também através do ciclo de Carnot, é possível determinar que uma usina termelétrica operando a 800°C desenvolve uma eficiência de 73%. As vantagens de uma lagoa solar em comparação à meios convencionais de geração de energia, e que compensam seu rendimento relativamente baixo, residem na natureza não-poluente e gratuita de coletores solares.

## 5.5. ESTABILIDADE DE LAGOAS SOLARES

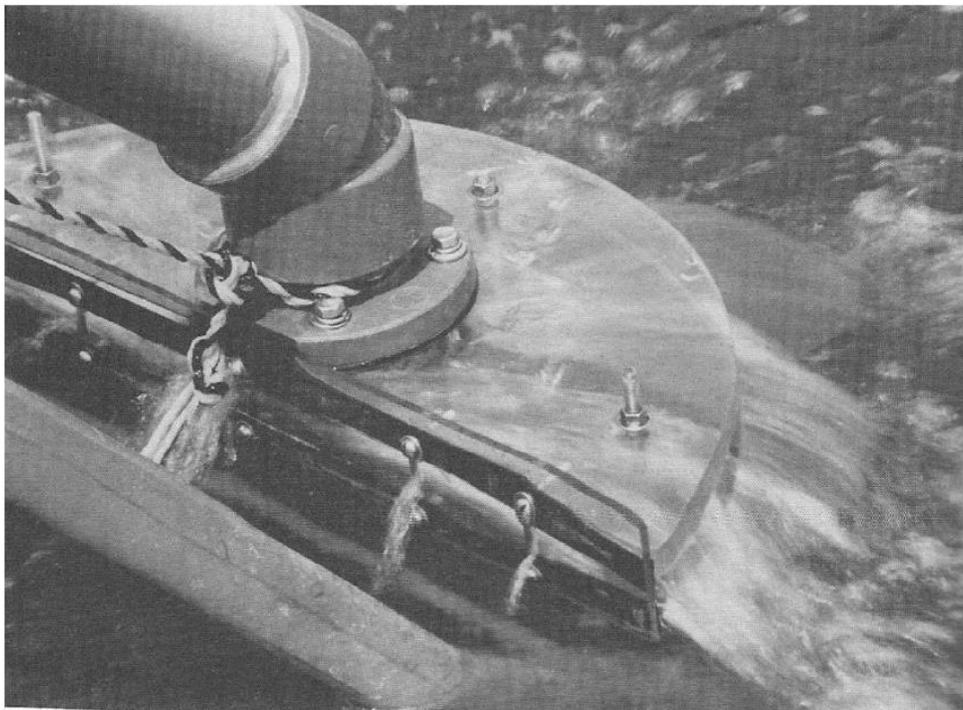
O principal fator na estabilidade de uma lagoa solar é manter o perfil da salinidade na zona intermediária da lagoa. Uma lagoa solar de gradiente salino não operará eficientemente sem uma NCZ estável. A principal consideração a se tomar durante o projeto de uma lagoa para garantir a eficiência e produtividade é manter as camadas limites da NCZ e o gradiente salino.

A estabilidade desejada não será atingida a não ser que o gradiente de concentração salino seja instalado perfeitamente e a difusão do sal dentro da camada não convectiva da lagoa seja controlado com sucesso. A densidade da salmoura é função da concentração de sal e da sua temperatura, e ambas devem aumentar com a profundidade da lagoa. Embora a densidade da

solução diminua com a temperatura, a sua correlação direta com a concentração de sal tem maior impacto do que a diminuição que acompanha a elevação da temperatura. A influência inversa da temperatura e concentração de sal na solução gera um equilíbrio instável na lagoa, que requer que a densidade da salmoura na zona não convectiva cresça com a profundidade para evitar a difusão do gradiente ou que a lagoa se torne instável e as camadas “virem”.

### 5.5.1. CRIAÇÃO DO GRADIENTE DE SALINIDADE

Para criar tal estado de equilíbrio, o método de preenchimento da lagoa e estabilização do gradiente é um fator crucial. O difusor é uma peça que desempenha papel essencial no preenchimento e manutenção de uma lagoa solar de gradiente salino. Um difusor normalmente consiste em um tubo de diâmetro grande com duas placas em sua extremidade, afastadas em 2 a 3 mm como mostra a figura 13.



**Figura 13 - Difusor de água fresca**

**Fonte: Alenezi, 2012.**

Durante a execução de várias lagoas solares, a velocidade de fluxo de 2,6 m/s de água foi descoberta como sendo próxima do ideal para a difusão de água fresca em salmoura (ALENEZI, 2012).

O sal mais comumente utilizado em lagoas solares é o cloreto de sódio, que é misturado à água para produzir salmoura. Usualmente, esse processo é executado externamente à lagoa, em estruturas especialmente projetadas para esse fim, como lagoas misturadoras ou misturadores industriais, embora seja possível produzir salmoura na própria lagoa. Algumas técnicas de produção de salmoura já são bastante conhecidas e difundidas, como a de Collins, que utiliza um poço de mistura e um conjunto de filtros para garantir que a solução final não terá partículas insolúveis (ALENEZI, 2012).

Após a difusão do sal e criação da salmoura, a solução é conduzida para a lagoa e é iniciada a estabilização do gradiente salino na NCZ, através da difusão de água fresca na camada superior da salmoura. A técnica desenvolvida por Zangrando é a mais aceita e praticada para criar o gradiente. O autor afirma que o método mais simples para estabelecer o gradiente salino em uma lagoa solar pode ser executado através de três etapas.

- Primeiramente, salmoura concentrada deve ser despejada na lagoa de maneira a atingir metade da profundidade da camada não convectiva.
- Então, água fresca deve ser adicionada à lagoa em quantidades exatas para a formação de camadas. A diferença de densidade entre a água fresca e salmoura concentrada faz com que só ocorra difusão entre a solução que se encontra acima da posição do difusor, pois a água fresca após a injeção na salmoura segue a sua tendência normal de subir. Assim, é possível determinar a profundidade na qual o difusor deve ser posicionado como função do fluxo de água fresca adicionada e da concentração desejada em cada profundidade. Este passo irá diluir a concentração inicial da salmoura e criar o gradiente.
- A etapa final consiste em, após a formação das camadas de gradiente, adicionar água fresca em quantidade para o preenchimento da camada convectiva superior, UCZ.

Um método alternativo foi sugerido por Nielsen, onde o gradiente é obtido através da mistura da solução e água fresca bombeando água do fundo da lagoa utilizando uma válvula de mistura (Nielsen, 1980). A vantagem deste método sobre o de Zangrando é a possibilidade de se ajustar o volume de solução misturada à água fresca, enquanto o de Zangrando distribui água fresca diretamente no corpo de salmoura. Por esse motivo, é recomendado que durante a execução do método de Zangrando a salinidade seja constantemente verificada e controlada (ALENEZI, 2012).

### 5.5.2. ESTABILIDADE ESTÁTICA DO GRADIENTE

A estabilidade interna de uma lagoa solar é dependente da difusão de sal da zona de armazenamento em direção às zonas superiores da lagoa. Difusão pode ser definida como o movimento, ou migração, de um componente em uma solução. A principal causa da difusão é uma diferença de concentrações, ou o gradiente de concentração de um componente em um fluido. Uma solução sempre procura se tornar internamente estável através da equiparação de suas concentrações. Consequentemente, moléculas se deslocam da região com maior concentração para a de menor. Em uma situação em que não existe nenhuma pressão resultante sobre a solução ou outro tipo de difusão forçada, o fluxo de massa dentro do fluido é dependente dos diferenciais de concentração e do gradiente de temperatura. Esses mecanismos são conhecidos como difusão molecular e térmica, respectivamente. Infelizmente, ambos os mecanismos atuam contra a estabilidade de uma lagoa solar, portanto a manutenção do gradiente é absolutamente essencial para o desempenho de uma lagoa solar.

A difusão molecular ocorre como resultado do gradiente de concentração em uma solução e esse tipo de difusão acontece em acordo com a lei de Fick. A difusão térmica foi descoberta por Carl Ludwig em 1856, quando um experimento demonstrou que uma coluna de água salina de concentração uniforme sofria alteração quando aquecida em uma extremidade e resfriada em outra. A concentração de sal, antes uniforme, se tornou maior na região que sofria resfriamento. A este fenômeno se dá o nome de *efeito de Soret*.

O gradiente de densidade da água que resulta da diferença de concentração na lagoa é chamado de “gradiente positivo”, pois ele contribui para a formação de um perfil de salinidade esperado em uma lagoa não convectiva. Entretanto, o efeito de Soret, consequente do perfil de temperatura da lagoa, trabalha no sentido contrário. Assim, a condição de estabilidade da lagoa é escrita pela seguinte fórmula:

$$\alpha_t \cdot \frac{dT}{dx} \leq \beta_t \cdot \frac{dS}{dx} \quad (9)$$

Onde;

$\alpha_t$  – Coeficiente de expansão térmica da água;

$\beta_t$  – Coeficiente de expansão salina da água;

$\frac{dT}{dx}$  – Gradiente de temperatura com a profundidade;

$\frac{dS}{dx}$  – Gradiente de salinidade com a profundidade;

## 5.6. DESSALINIZAÇÃO

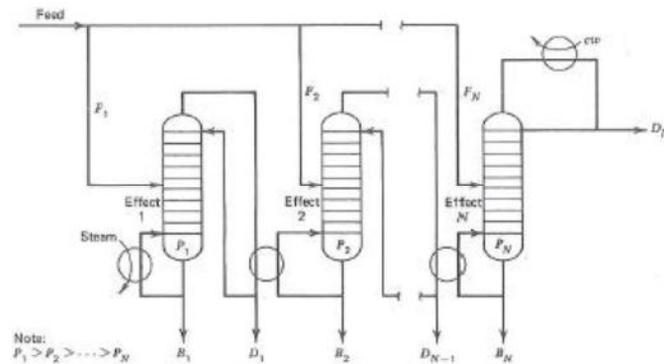
Em alguns países do mundo a dessalinização não é somente viável mas necessária em fonte de grande parte da água de abastecimento público. Países como a Arábia Saudita, Israel e Kuwait, ou locais como a Ilha de Chipre, onde os lençóis freáticos foram reduzidos por conta da exploração exagerada têm essa tecnologia como essencial em seu estilo de vida. Em Chipre, a água do mar é responsável por cerca de 50% do abastecimento desde 2001. (SABESP, 2015).

Atualmente, as duas tecnologias de dessalinização mais empregadas são responsáveis por 70% da dessalinização de água do mundo. Tanto o método de Destilação Multiestágios (MEE) quanto a Destilação Flash de Múltiplo Estágio (MSF), métodos mais aplicados atualmente, consomem quantidades copiosas de energia. Cada metro cúbico de água que passa pelo processo de dessalinização requer 49,8 kWh de energia, dos quais 3% em forma de energia elétrica e 97% em calor. Ambos os métodos, embora cada vez mais necessários, não são eficientes do ponto de vista econômico, principal motivo para a integração da energia solar no processo de dessalinização (ALENEZI, 2012).

Em 2002 um estudo foi conduzido na Universidade de El Paso (UTEP) onde um sistema de dessalinização MSF combinado à uma lagoa solar como sua única fonte de energia térmica. Uma das primeiras vantagens do conjunto de tecnologias é a possibilidade de se criar um sistema com “descarga zero”, i.e., um conjunto onde o rejeito de um módulo é aproveitado pelo outro. O subproduto de alguns processos de dessalinização é salmoura concentrada e aquecida. Tanto a grande concentração de sal quanto a temperatura elevada da salmoura dificultam o seu descarte, pois tanto a salinidade como o calor podem trazer consequências negativas caso o descarte seja feito em um corpo de água natural, como o oceano ou rios e lagos. Uma lagoa solar agindo em conjunto com o sistema de dessalinização pode receber a salmoura sem nenhum efeito negativo (HUANMIN, 2002)

Sistemas de dessalinização MSF o fazem através do aquecimento de água salgada em um conjunto de tanques paralelos. Estes tanques apresentam diferentes pressões, iniciando em uma pressão superior à pressão atmosférica e diminuindo de tanque para tanque da sequência até uma pressão inferior à normal. Dessa maneira, o vapor que é eliminado de cada tanque tem temperatura diferente do tanque lado. Essa diferença de temperatura tem como efeito que o vapor de um tanque em menor pressão seja utilizado como fluido de resfriamento para o vapor de maior pressão. Sistemas MSF operam em temperaturas entre 120 e 70°C. A evaporação do fluido de cada tanque não é completa e há a formação de salmoura aquecida em cada tanque. Parte da salmoura é conduzida para o tanque ao lado e de pressão e temperatura de

ebulição menor, aumentando a temperatura inicial do sistema, diminuindo a energia necessária no processo. A figura 14 ilustra o sistema MSF.



**Figura 14 - Sistema de dessalinização MSF**

**Fonte: Alenezi, 2012**

A substituição das fontes convencionais de calor do sistema de dessalinização pela lagoa solar de gradiente salino acarretou na alteração das temperaturas de operação do MSF, pois a lagoa de UTEP opera entre 65-80°C. A contribuição da lagoa salina no conjunto ocorreu através do fornecimento de salmoura aquecida para a elevação da temperatura inicial da água a ser evaporada e fornecendo a energia térmica para a ebulição da água salgada, e através do fornecimento de água da UCZ, em temperatura ambiente para auxiliar o resfriamento dos vapores resultantes do processo.

As conclusões do projeto são:

- Um sistema de dessalinização pode operar eficientemente no regime de temperaturas de uma lagoa solar;
- A qualidade da água resultante da dessalinização permaneceu nos padrões alterados quando da substituição;
- A utilização da água da UCZ para o resfriamento reduziu também parte da energia elétrica utilizada em uma MSF, anteriormente utilizada no resfriamento;
- A produção de água doce da unidade variou entre 1,63 a 5,00 litros por minuto de operação. A produção poderia aumentar com o aumento do diferencial de pressão entre as câmaras do MSF, limitadas pela faixa de temperaturas de operação da lagoa;
- A capacidade de lagoas solares de armazenarem calor representa uma grande vantagem em sistemas que dependem da produção contínua de água fresca.

## 5.7. ESTUDO DA LAGOA DE KUTCH DAIRY

Na Índia, a pesquisa de lagoas solares remonta à 1971 e lagoas solares foram construídas em Bhavnagar, Pondicherry, Bangalore, entre outros locais. Entretanto, enquanto essas lagoas auxiliaram no melhor entendimento desse tipo de coletor e sua demonstração, nenhuma dessas lagoas estava conectada à qualquer tipo de consumo ou destino (KUMAR, 1999) Tendo isto em vista, em 1983, uma proposta pelo Programa Nacional de Lagoas Solares foi submetido ao Ministério de Energias Não-Convencionais da Índia (MNES). Esta iniciativa deu início ao estudo de viabilidade de um projeto de uma lagoa solar de gradiente salino de 5.000m<sup>2</sup> para o fornecimento de energia termal à uma indústria de laticínios. A execução do projeto, então com sua geometria revisada e uma superfície total de 6.000m<sup>2</sup>, teve início em 1987 em Kutch Dairy, Bhuj, no estado de Gujarat, oeste da Índia, como uma colaboração entre a Agência de Desenvolvimento Energético de Gujarat (GEDA), Instituto de Pesquisas Energéticas Tata (TERI) e a Corporação de Desenvolvimento de Laticínios de Gujarat (GDDC). O projeto pode ser descrito em 4 fases principais, abaixo listadas:

- Fase 1: Construção da lagoa e operação inicial (Julho 1987 à Maio 1991)
- Fase 2: Análise de falhas (Junho 1991 à Abril 1992)
- Fase 3: Reestabelecimento da lagoa e suprimento de água quente à fábrica de laticínios (Maio 1992 à Abril 1995)
- Fase 4: Adição de sal e renovação do suprimento de água quente (Dezembro 1995 à Abril 1997)

### 5.7.1. Fase 1: Construção da lagoa

Terraplenagem e escavação.

A propriedade da indústria de laticínios Kutch contava com uma porção desocupada de terreno, porém acidentada e com declive, onde foi possível a instalação do projeto. As características íngremes e acidentadas do terreno tornaram necessária a terraplanagem da área de instalação da lagoa, com uma elevada quantidade de aterros. Verificadas as dimensões do terreno disponível, a área da lagoa foi ajustada e fixada em 6.000m<sup>2</sup> (98mx61,25m). Afim de garantir a estabilidade estrutural das paredes da lagoa, os taludes foram cortados em inclinações de 2:1. A profundidade inicial de projeto, de 3m, foi alterada para 3,5m, buscando-se uma camada convectiva inferior (LCZ) de 1,5m e assim um maior volume de água aquecida e energia retida. Juntamente da lagoa principal, duas lagoas menores foram construídas no mesmo terreno

com dimensões de 15x15x4m. Uma lagoa de evaporação de 30x30x1m também foi planejada.

Após o fim dos projetos em julho de 1987, tiveram início os serviços de escavação. O terreno apresentava um declive no sentido SO-NE, de maneira que a porção nordeste da lagoa se encontrava em um nível bastante inferior à porção sudoeste, tornando necessária a execução de aterros em cerca de 10m do perímetro da lagoa. A compactação deste aterro não foi executada corretamente no ano de 1987, tornando necessária a intervenção e reparo ainda no primeiro ano de operação da lagoa. Para evitar a possível acumulação de gases sob o revestimento da lagoa, bem como para monitorar a perda de água por falhas no isolamento e impermeabilização, uma rede de drenagem em tubos de PVC perfurados foi instalada sob a lagoa (KUMAR, 1999).

#### Revestimento da lagoa solar

Um dos principais desafios da instalação da lagoa em Bhuj foi desenvolver uma solução local e com bom custo-benefício para o revestimento da lagoa, baseado em materiais locais. A lagoa de Beith Ha' Arava, em Israel, utilizou uma combinação de argila e polietileno para esse mesmo revestimento. A solução se provou bastante eficiente técnica e financeiramente, porém essa tecnologia foi patenteada e poucos detalhes divulgados. Similarmente, a lagoa solar de Cuernavaca, México, também foi revestida com uma combinação de argila-polietileno e suas especificações também não foram divulgadas. Estudos de laboratório demonstraram que a argila tem potencial para a utilização como material de revestimento. Pode Entretanto, o uso somente de argila em um ambiente tão agressivo quanto o de uma lagoa solar talvez não seja adequado, pois a salmoura em alta temperatura pode fazer com que certas argilas floculem, tornando-as mais porosas. Testes laboratoriais apontaram que um sanduíche, constituído de uma membrana plástica entre duas camadas de argila, é bastante eficiente como isolante e impermeabilizante. A membrana escolhida é composta por LDPE, ou polietileno de baixa densidade, e a argila caulinita (China clay), abundante na região (KUMAR, 1999).

Diversas configurações de revestimento foram testadas no local, em cinco poços de testes escavados para esse fim. Inicialmente, a argila compactada no seu ponto de umidade ótima demonstrou ótimo desempenho do ponto de vista da impermeabilidade, porém apresentou dois problemas práticos. A argila molhada é de bastante difícil manuseio, impraticável na grande área de revestimento da lagoa, e ao secar, a argila compactada apresenta grande retração, o que causa fissuras. A fim de mitigar a retração da argila e aumentar a sua trabalhabilidade, solo peneirado foi adicionado à mistura. A adição desse solo minimizou a formação de fissuras de retração, porém ao custo do

coeficiente de permeabilidade. Após diversos experimentos, decidiu-se pela relação de 3:1 entre argila e solo peneirado.

Finalmente, o revestimento foi definido na seguinte estrutura:

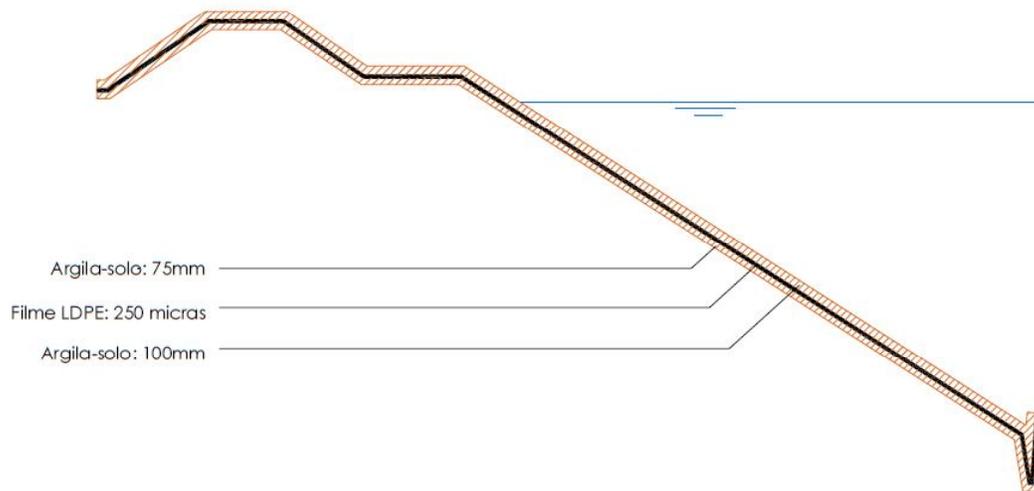
1. 75mm da mistura argila-solo compactada,
2. Filme LDPE de 250 micras, juntas soldadas termicamente no local,
3. 100mm de argila-solo compactada, aplicada em 2 camadas para minimizar os efeitos da retração por perda de água,
4. Revestimento em tijolos nas regiões de juntas da camada LDPE,

Após a aplicação de 225m<sup>2</sup> do revestimento nas lagoas secundárias, e experiência suficiente da instalação adquirida, iniciou-se o revestimento da lagoa principal. Um fator crucial na eficiência do revestimento é a compactação da argila-solo, que exigiu um controle bastante rigoroso e supervisão constante. Os taludes foram compactados manualmente, com o auxílio de marretas, enquanto o fundo da lagoa foi compactado em duas camadas, utilizando um rolo compactador na primeira camada e manualmente na segunda.

O revestimento em polímero foi realizado em seguida, abrindo-se filmes de 9m de LDPE e soldando-os no local, para então a sua aplicação na lagoa. Verificou-se durante a soldagem das emendas do filme LDPE que uma fina camada de argila se aderiu ao polímero, não sendo possível removê-la manualmente e impossibilitando a correta vedação da camada. A camada de finos foi removida com o auxílio de ácidos antes da soldagem.

Para compensar possíveis falhas no revestimento LDPE, como bolhas de ar ou locais de vedação não-conforme, uma nova película de 100 micras foi aplicada sobre a já existente. Camadas de solo peneirado de 50mm foram introduzidas sob e sobre esta nova camada polimérica (KUMAR, 1999). A aplicação de compactação da camada exterior de argila-solo procedeu da mesma maneira

que a camada interna. O revestimento final está representado na figura 18.

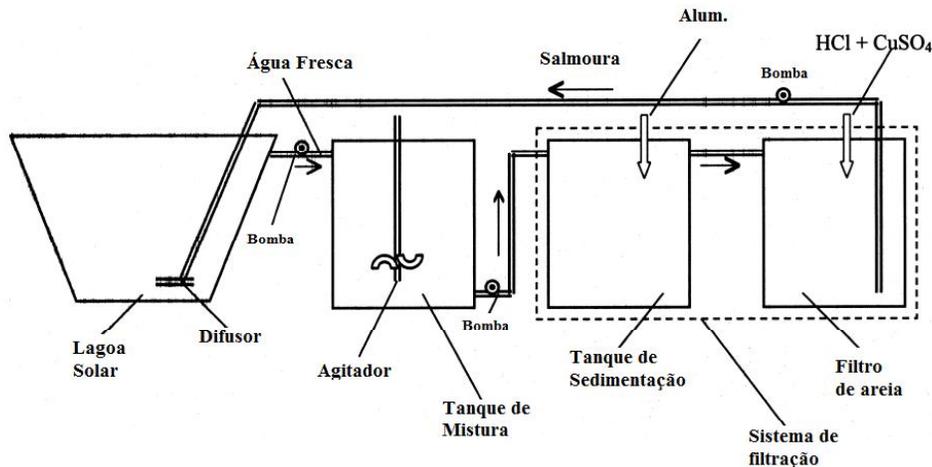


**Figura 15 - Revestimento da superfície da lagoa**

**Fonte: Kumar, 1999.**

Dissolução de sal e estabilização do gradiente salino.

A preparação de salmouras costuma ser um processo bastante demorado. A lagoa da Universidade do Texas em El Paso, UTEP, utilizou 1.100 toneladas de sal, que levaram 5 meses para serem dissolvidos e aplicados. Outra dificuldade comumente encontrada, sais comerciais contêm impurezas que podem tornar, e costumeiramente o fazem, a lagoa turva. Para superar estes desafios, um sistema consistindo em uma lagoa de mistura, um tanque de decantação e o filtro de areia foram construídos.



**Figura 16 - Sistema de dissolução de sal**

**Fonte: Kumar, 1999**

Primeiramente, a lagoa solar foi preenchida com água. As camadas superiores de água foram bombeadas à lagoa de mistura, onde o sal foi adicionado e criada a salmoura concentrada. A salmoura então foi conduzida para o tanque de decantação e para o filtro de areia. Após a filtração e da adição de agentes para o controle de algas e transparência (ácido hidrocloreto e sulfato de cobre), a salmoura foi bombeada novamente para a lagoa, sendo devolvida para o fundo através de um difusor. Este processo possibilitou a dissolução de 3.500 toneladas de sal em dois meses e meio. Em seguida, foi injetada água doce na solução concentrada para criar o perfil de salinidade desejado (KUMAR, 1999).

A maior parte das lagoas solares desenvolvidas até então utilizavam o perfil de salinidade linear. Entretanto, o perfil de salinidade de equilíbrio neste tipo de solução não é linear, e essa discrepância deu origem à instabilidade de diversos projetos. Por esta razão, foi decidido por um perfil de salinidade não-linear, conforme o gráfico abaixo; gráfico salinidade

Esse perfil é executado alterando-se a trajetória e velocidade de injeção do difusor, ao invés de uma ascensão em trajetória linear e velocidade de injeção constante. A trajetória e velocidade de ascensão são funções de: valores de salinidade de equilíbrio, geometria da lagoa, diâmetro do difusor, abertura do difusor e o número de Froude da injeção de água doce na salmoura. É recomendado que para a mistura de dois fluidos ocorra sob e sobre o nível do difusor, o número de Froude seja mantido em 18. O cálculo do tempo de injeção, para uma dada configuração de fluxo, foi realizado com o auxílio de uma rotina de cálculos.

O difusor, com abertura de injeção nunca maior que 18mm, foi posicionado no centro de um dos lados de 61,25m, e não no centro da lagoa,

como usual. Medições realizadas na outra margem da ponte, a 98m de distância, não acusaram variações no perfil de salinidade. Foram necessárias 173 horas para a estabilização do gradiente de salinidade (KUMAR, 1999).

Controle de claridade e perturbações pelo vento.

A claridade da solução de água e sal é um dos principais fatores na eficiência térmica de lagoas solares. Por conta da elevada salinidade da lagoa, detritos carregados pelo vento, como poeira e outras partículas em suspensão, nem sempre afundam até o fundo da lagoa, mas podem permanecer em suspensão em determinado nível. Sulfato de alumínio foi utilizado para promover a floculação, e assim facilitar a remoção destas partículas. Para controlar a proliferação de algas, foram testados hipoclorito de cálcio, cloro e sulfato de cobre, porém considerados ineficientes. Assim, acabou-se optando por uma mistura de ácido hidrocloreídrico e sulfato de alumínio para obter a transparência desejada. Verificou-se que o sulfato age com maior eficiência se o pH da salmoura tem caráter ácido, assim foi injetada uma solução de sulfato de alumínio em ácido hidrocloreídrico diluído no nível em que as algas se proliferavam, eliminando-as e também evitando o seu crescimento. Durante um ano de operação, foram consumidas as seguintes quantidades de químicos:

- Sulfato de alumínio – 595 kg
- Ácido hidrocloreídrico – 550 L
- Sulfato de cobre – 47 kg

A transmissão de raios solares na salmoura é quantificada pelo produto transmissividade-absorvidade, que em uma lagoa com boa assume o valor de 0,45. Durante o verão de 1991, utilizando um medidor de silício, foi registrado o valor de 0,434, indicador de um bom nível de claridade da lagoa (KUMAR, 1999).

Um dos componentes cruciais da manutenção de uma lagoa solar é o controle de perturbações criadas pelo vento. A região de Bhuj recebe bastante vento, com uma média anual superior à 3,6m/s, e ondas de vento foram geradas durante a dissolução de sal. É comum a utilização de estruturas de PVC no formato de anéis ou quadrados, posicionadas na superfície das lagoas para suprimir possíveis ondas. Entretanto, durante a operação de estabilização do gradiente salino, a salinidade e massa específicas da UCZ eram elevadas o suficiente para que tal estrutura não desempenhasse sua função plenamente, alongando o tempo necessário para o processo de estabilização do gradiente salino em diversas horas. Durante a operação da lagoa, essa estrutura foi substituída por um sistema de redes de HDPE (polietileno de alta densidade) presas a cordas. Este sistema foi inspirado em um conjunto de redes desenvolvido em Israel com o fim específico do controle de perturbações do vento, porém aplicado com materiais comerciais buscando a viabilidade financeira (KUMAR, 1999).

### 5.7.2. Fase 2: Análise de falhas

Em maio de 1991 a lagoa estava em pleno funcionamento e registrou sua temperatura máxima de 99°C. Porém, poucos dias depois, em 18 de maio, foi verificada a queda de 5 cm do nível da água, um valor muito acima das possíveis perdas por evaporação, queda também acusada pelo sistema de monitoração dos níveis de salinidade. Ao evacuarem o sistema de ventilação instalado sob a lagoa, salmoura quente foi encontrada, indicando que a perda de volume ocorreu pelo fundo da lagoa. Forçando-se ar no sistema de ventilação e identificando o local por onde surgiam bolhas na lagoa foi possível identificar os possíveis locais de vazamento. Várias tentativas de despejar argila sobre essas infiltrações reduziram a queda diária de 5cm no nível de água para 1 cm, porém não a eliminou. Foi então decidido esvaziar a lagoa, retirar o revestimento e analisar sistematicamente as causas da falha na contenção.

A argila retirada foi enviada para o laboratório para análise de suas propriedades físicas e químicas e comparação com argila virgem. Os resultados dos testes indicaram nenhuma alteração considerável nas propriedades após a exposição à salmoura quente. Não foram identificadas alterações no limite de liquidez, índice de plasticidade e permeabilidade vertical antes e depois da utilização na lagoa. Pode ser concluído, então, que a falha na vedação da lagoa não se deu por conta de alterações nas propriedades da argila. Os filmes LDPE retirados e um relatório das condições da lagoa foram encaminhados para o professor Dan Zaslavsky, da Universidade do Estado de Iowa, responsável pelo desenvolvimento de sistemas de revestimento de várias lagoas solares em Israel, para análise. Apesar Zaslavsky não ter sido suficientemente profunda para determinar as causas das infiltrações, foram feitas as seguintes observações:

- O filme de LDPE de 250 micras sofreu certa deterioração apesar da sua completa cobertura. A resistência do filme foi reduzida e foram observadas rachaduras e regiões de extrema fragilidade foram observadas.
- As soldas térmicas permaneceram intactas, exceto por poucas falhas pontuais.
- A argila sob a camada principal de LDPE apresentava pequenas fissuras de retração.
- Enquanto a maior parte do sistema de ventilação permaneceu intacta, parte dele se encontrava completamente distorcido. Essa distorção se deve, obviamente, à entrada de salmoura aquecida nos dutos de PVC. Acima da região danificada do sistema de PVC foram observados três furos de aproximadamente 15cm de diâmetro que ligavam o fundo da lagoa ao sistema de ventilação.

Essas observações sugerem que a falha na vedação ocorreu por conta da formação de bolhas de ar sob o revestimento. O ar presente nas fissuras por retração da argila e nos dutos de ventilação podem ter formado espaços de ar confinados e pressurizados, que acabaram por causar vazamentos que conduziram a salmoura ao sistema de ventilação. As distorções dos dutos de PVC podem ter bloqueado a passagem do ar em parte da ventilação, forçando novas bolsas de ar. No caso de o ar preso sob o revestimento se encontrar originalmente sob a pressão da coluna de 3,5m de salmoura à 25° C, a sua pressão seria de aproximadamente 1,4 atm. Com o aumento da temperatura para 80° C a sua pressão pode ser aproximada pela equação dos gases perfeitos, e estimada em 1,63 atm.

$$P_1.V = n.R.T_1 = P_2.V = n.R.T_2 \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{1,4.(273 + 80)}{(273 + 25)} = 1.63 \text{ atm}$$

A pressão no outro lado do revestimento permaneceria a de 1,4 atm, gerando um diferencial de 0,23 atm (0,2376 kg/cm<sup>2</sup>). Este diferencial entre as diferentes camadas do revestimento muito provavelmente teria promovido as tensões responsáveis pela ruptura da argila, que tem apresenta baixa resistência a tensões tanto de cisalhamento quanto de compressão. Essa explicação para as falhas do sistema de revestimento foi tomada como a mais provável e a partir dela traçado um novo projeto de revestimento (KUMAR, 1999).

### **5.7.3. Fase 3: Reestabelecimento e fornecimento de água quente para a indústria de laticínios.**

Considerando a presença de bolhas de ar como a principal causa da falha na vedação, foi decidido remover completamente o sistema de ventilação do projeto. Com o mesmo propósito de evitar o acúmulo de ar sob a lagoa, decidiu-se não soldar termicamente as películas de LDPE, mas transpassá-las, evitando as dobras necessárias para o processo de soldagem, que poderiam facilmente capturar bolhas de ar. Enquanto o transpasse das películas irá permitir a percolação de salmoura, isso manterá as camadas de argila úmidas e reduzirá a retração e geração de fissuras e conseqüentemente as bolsas de ar. Decidiu-se também utilizar uma película LDPE sem a pigmentação preta do polietileno, que segundo pesquisadores de polímeros acelera a degradação do plástico. A nova configuração do sistema de revestimento foi a seguinte:

- Remoção da rede de dutos sob a lagoa,
- Instalação de duas camadas de filme de polietileno, sem aditivos e pigmentos,
- Os panos da membrana de LDPE não mais soldados, somente transpassados.
- Alteração da espessura da camada de argila-solo para 90cm, compactadas em três camadas de 30cm.

Os serviços de retirada e restauração do revestimento foram realizados somente no fundo da lagoa, mantendo as laterais intactas. O novo revestimento plástico foi soldado termicamente ao LDPE antigo no perímetro do fundo da lagoa (KUMAR, 1999).

#### Instalação do sistema de revestimento revisado

As camadas de 30 cm de argila foram divididas em três camadas de 10cm e compactadas separadamente com o auxílio de um rolo compactador. Finalizada a compactação dos primeiros 30 cm, foi aplicada a primeira camada de LDPE. As membranas foram posicionadas de maneira a obter 50 cm de transpasse. A execução das segunda e terceira camadas de argila-solo, instalação da segunda camada de LDPE se deram da mesma maneira (KUMAR, 1999).

#### Dissolução de sal e estabilização do gradiente

Enquanto a dissolução do sal na fase 1 da lagoa tomou mais 2 meses de trabalho, foi decidido refazer essa operação em menos de um mês na fase 3. Para isso, o tanque de mistura foi aumentado e o rotor do misturador alterado, aprimorando assim o design do misturador. O novo sistema de mistura necessitou de menos de um mês para dissolver as 3.200 toneladas de sal da salmoura.

O sistema de estabilização do gradiente salino foi o mesmo utilizado quando da construção da lagoa, porém o difusor também foi alterado para a execução da operação em menor tempo. O diâmetro do difusor foi aumentado de 30cm para 50cm. O tempo para a estabilização foi reduzido de 173 para 115h, nas quais 5.9 milhões de litros de água foram injetados na salmoura. A diminuição no tempo de estabilização se deve tanto à alteração do design do difusor quanto à diminuição da profundidade da LCZ para 1,0m de profundidade, causada pelo incremento da espessura da camada de argila do fundo da lagoa (KUMAR, 1999).

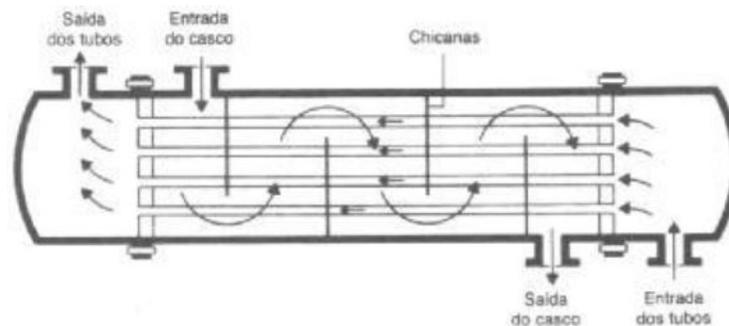
#### Fornecimento de água quente para a indústria de laticínios

A lagoa voltou a ser aquecida em junho de 1993 e a LCZ atingiu uma temperatura de 80° em agosto do mesmo ano. Neste intervalo foi projetado o

trocador de calor e instalada a linha de dutos que transportariam a água aquecida à fábrica, afastada 175m da lagoa.

A retirada de calor útil da lagoa pode se dar de duas maneiras diferentes, através de um trocador de calor instalado na própria lagoa ou bombeando-se salmoura aquecida da LCZ para um trocador de calor externo e devolvida à lagoa. O segundo método apresenta a vantagem de apresentar uma maior eficiência do trocador, tornando viável um trocador menor. A manutenção de um sistema de troca de calor externo também é mais simples que a de um radiador submerso. O sistema de extração de salmoura consiste na sucção da salmoura e difusores de descarga, bomba de sucção e a tubulação associada. É crucial que neste tipo de sistema o ritmo de extração e localização da sucção sejam selecionados cuidadosamente para que a retirada e devolução da salmoura não cause perturbações no gradiente da lagoa. As taxas de retirada e devolução da lagoa à LCZ são funções dos “Bulk Richardson Number” e “Local Richardson Number”. Baseado nesses números e em alguns testes conduzidos na lagoa e fora dela, se estabeleceu a vazão de 70m<sup>3</sup>/h de salmoura. Também se considerando os valores de Richardson para garantir a estabilidade do gradiente, a sucção foi posicionada 20cm abaixo da interface LCZ-NCZ e o difusor de devolução 20cm abaixo da retirada. Os difusores de sucção e injeção de salmoura foram posicionados no mesmo lado da lagoa, porém distanciados 3m um do outro na horizontal (KUMAR, 1999).

Sendo a incrustação do trocador de calor a principal dificuldade do trabalho com salmoura, foi decidido adotar um trocador do tipo concha e tubo. Trocadores deste tipo forçam um escoamento turbulento, que minimiza o depósito de materiais no seu interior. Seu design também possibilita a limpeza do seu interior com bastante facilidade e simples e pouca manutenção (Figura 20).



**Figura 17 - Trocador de calor "Shell and Tube"**

**Fonte: Southwest Thermal Technology Inc, 2015.**

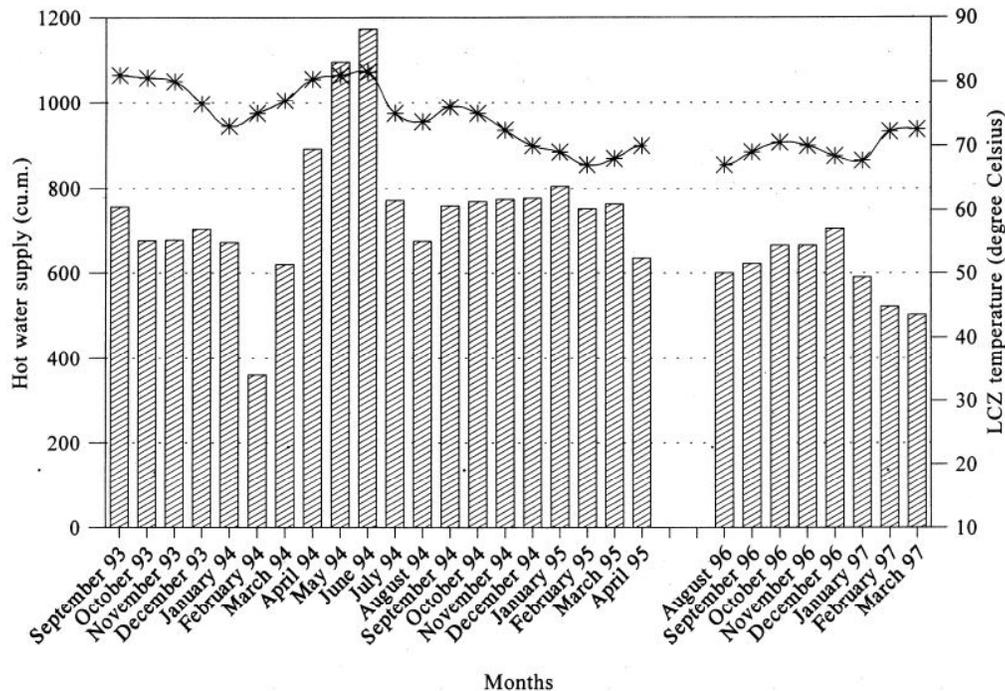
Com a salmoura sendo conduzida pelos tubos e a água pela concha, o sistema transmitiu 34 kW<sub>th</sub>, através de 36,1m<sup>2</sup> de contato. As vazões de trabalho foram de 70 m<sup>3</sup>/h de salmoura e 8 m<sup>3</sup>/h de água. O gráfico a seguir

expõe o histórico de temperaturas da LCZ e o fornecimento de água quente. A retirada de calor teve início em setembro de 1993 e continuou até abril de 1995. Nesse período mais de 15.000 m<sup>3</sup> de água quente foram fornecidos à fábrica de laticínios. A demanda de da fábrica era de 25m<sup>3</sup> diários de água a 70° C, o que corresponde somente a 31% da capacidade de geração da lagoa, de 80m<sup>3</sup> diários. Como um exercício da capacidade da lagoa, neste período foi retirado da lagoa os 80m<sup>3</sup> de projeto e o excedente de água quente devolvido à superfície. A extração de calor na sua capacidade máxima não resultou em uma diminuição perceptível da temperatura da lagoa (KUMAR, 1999).

Um cálculo grosseiro estima que durante o período de fornecimento foram economizadas 935 toneladas de lignito (um tipo de carvão formado pela compactação de turfa, de baixo teor calórico), que se traduz em uma economia de U\$ 19.444,00, U\$ 30.289.59 em valores atuais. O período para a recuperação do capital investido na instalação do sistema de coleta da lagoa solar de gradiente salino é de aproximadamente 5 anos, sem a consideração de quaisquer subsídios ou isenções de impostos. Considerando-se que essa foi uma das primeiras lagoas solares de grande escala instaladas na Índia e a primeira com propósitos industriais, a viabilidade econômica era bastante promissora. Futuros aperfeiçoamentos na técnica construtiva, especialmente do sistema de revestimento e vedação, têm potencial para diminuir os custos de instalação deste sistema (KUMAR, 1999).

#### **5.7.4. Fase 4: Adição de sal e renovação do fornecimento de água quente**

A lagoa solar de Bhuj, quando em operação, era de suposta responsabilidade da Corporação de Desenvolvimento de Laticínios de Gujarat (GDDC), que deveria promover a manutenção do sistema. Essa manutenção incluía, mas não se limitava a operação diária das bombas, monitoramento semanal de temperaturas, densidades e níveis, injeção regular de químicos para o controle de transparência e adições anuais de sal. O GDDC, entretanto, enfrentou grandes dificuldades financeiras em 1994, que comprometeram a manutenção da lagoa, que sofreu a paralização de suas operações em 1995. O Ministério de Energias Não-Convencionais da Índia (MNES) concedeu um auxílio pontual para a manutenção do sistema. Com o auxílio governamental, foi realizada a adição de sal e a nova estabilização do gradiente em julho de 1996. As temperaturas da LCZ neste período estão representadas na figura abaixo.



**Figura 18 - Histórico de temperaturas na LCZ de Bhuj**

Fonte: Kumar, 1999.

Após o treinamento de funcionários do GDDC sobre a manutenção da lagoa, as operações foram entregues ao órgão em abril de 1997 (KUMAR, 1999).

## 5.8. ESTUDO DA LAGOA DE GRAY MOUNTAIN/ASEC

Este projeto foi solicitado pela Comissão de Energia Solar do Arizona (ASEC) com o fim de explorar a viabilidade da instalação de lagoas solares como uma fonte de energia térmica de baixa temperatura.

Quando do início dos estudos de viabilidade da instalação destes sistemas no Arizona, o campo de manutenção Gray Mountain estava em construção. Com aproximadamente 28 acres, aproximadamente 113.000 m<sup>2</sup>, de terreno e completamente cercado, o local receberia um prédio com equipamentos de manutenção do Departamento de Segurança Pública do Arizona. Todos estes aspectos tornaram o local ideal para a instalação da lagoa experimental e por se encontrar ainda em execução, o projeto de Gray Mountain foi alterado de maneira a recebê-la.

O campo de manutenção Gray Mountain se encontra aproximadamente 80 km à norte de Flagstaff, Arizona. O local se encontra em um platô com inclinação suave que se estende por 95 km na direção norte-sul à uma altitude de 1.700m com relação ao nível do mar. No local será instalado um galpão para os equipamentos de manutenção do departamento, uma série de escritórios dos pessoais de manutenção e construção e moradias para os funcionários estacionados na instalação.

A geologia do terreno consiste de sedimentos que foram consolidados e formaram uma rocha carbonácea que foi intrudida e levemente alterada por águas subterrâneas. Essa é uma representação clássica de uma formação tipo Platô Kaibab. Este tipo de formação é de difícil escavação e por vezes exige o uso de explosivos. A dificuldade da explosão dessa rocha é que o calcário quando já fraturado conduz a energia da explosão em direções difíceis de serem previstas (HAUSKINS, 1987).

O clima da região é típico de grandes planícies em regimes semiáridos. As condições do vento prevaletentes são comumente acentuadas pelo transporte de partículas de solo, por vezes as tempestades de areia resultantes são bastante severas. A velocidade média do vento em Gray Mountain é de 16 km/h a 10 metros de altura da superfície. A precipitação anual é de 12-15mm e a temperatura varia com grande amplitude, comum em regiões secas e semiáridas, variando entre  $-10^{\circ}$  e  $37^{\circ}\text{C}$ . As variações térmicas diárias e anuais são de interesse particular nesse projeto pois o propósito da lagoa solar nessa instalação é o suprimento de calor para o sistema de aquecimento das dependências de Gray Mountain. A radiação solar média no solo do Arizona é de  $2.000 \text{ kWh/dia.m}^2$ .

Os cálculos da carga de aquecimento necessária para o prédio de manutenção são dependentes da condução normal de calor pelos  $1.047 \text{ m}^2$  de paredes metálicas do edifício, infiltrações, perdas de calor pelo solo, fator de vento e as variações do diferencial de temperatura entre o interior e exterior. Os valores destas perdas foram calculados separadamente para compor uma quantidade de calor necessária de 78.310 BTU diários, aproximadamente 23 kW ou 82.621,4 kJ. Esse valor é a média anual do total de energia diária necessária para manter a temperatura no edifício constante. O sistema foi projetado para operar automaticamente, acionando um sistema de ventilação quando o termostato detectar a queda de temperatura e interrompendo a circulação de ar quando a temperatura atingir os níveis desejados. As propriedades físicas do ar, massa específica e calor específico reduzidos, limitam a eficiência teórica de um sistema de transferência de calor que usa este fluido como meio de transporte. A eficiência de transferência de calor do sistema de ventilação instalado é de aproximadamente 20%. Outra limitação do fornecimento de calor ao edifício é que somente em uma fração do tempo o sistema operará e fornecerá energia nos seus valores máximos. A lagoa foi

dimensionada para fornecer aproximadamente 600.000 BTU por hora, quando operando em temperatura máxima de 62°C. Esse valor corresponde à cerca de 175 kW, valor 7,6 vezes maior do que a demandada. Entretanto, quando operando à 37.7°C, a potência gerada é reduzida para 200.000 BTU/h ou 58,6 kW, 2,54 vezes a potência demandada. Considerando as limitações do sistema de transferência de calor e da temperatura média de operação da lagoa, ela foi dimensionada para que a energia fornecida em qualquer momento ao sistema de ventilação excedesse a quantidade demandada em ao menos 100% (HAUSKINS, 1987).

O dimensionamento e projeto da lagoa foram realizados pelo Centro de Pesquisa em Transportes do Arizona (ATRC), com auxílio do Instituto de Pesquisa em Energia Solar de Golden, Colorado. O método de dimensionamento e dados ambientais considerados para o cálculo das temperaturas de operação e energia disponível não foram divulgados ao público. A dimensão final da lagoa é de 27,5x27,5 metros em sua superfície e 23,8x23,8 metros no fundo, com profundidade de aproximadamente 1,8 metros. Os taludes laterais têm inclinação de 1:1, o mais inclinado possível de ser executado com os materiais e equipamentos disponíveis.

Um modelo reduzido da lagoa foi construído em um laboratório do ATRC para verificar experimentalmente alguns dos princípios de funcionamento do sistema. Com os testes laboratoriais esperava-se responder questões sobre o comportamento térmico da LCZ e as características isolantes das camadas superiores da lagoa, bem como determinar o melhor método para o preenchimento da lagoa e estabilização do gradiente salino. O modelo construído tinha dimensões de 30x90 centímetros de superfície e 30 cm de profundidade. O modelo foi preenchido com salmoura até 8 centímetros do seu fundo e então completado com água fresca de modo a estabilizar o seu gradiente salino. A partir da experimentação em escala, escolheu-se o método de Zangrando para a estabilização do gradiente, a partir da difusão de água fresca em salmoura concentrada (HAUSKINS, 1987).

### **5.8.1. CONSTRUÇÃO DA LAGOA**

A execução do projeto se provou um desafio muito maior do que imaginado. A descrição da etapa de execução ilustra as diferenças entre a fase de projeto e planejamento e de construção de uma lagoa solar. A análise da etapa de dimensionamento de um sistema de coleta como o de Gray Mountain fornece informações importantes para o planejamento de projetos semelhantes, porém a análise da fase de construção ilustra diversos fatores que os projetistas não poderiam, e não puderam antever. A natureza de pesquisa do projeto trabalhou contra a eficiência financeira dos métodos construtivos

empregados, que resultaram em um custo bastante acima do praticado no mercado.

A composição do solo da região, rocha calcária, fez necessária a utilização de explosivos durante a etapa de escavação da lagoa. O material extraído durante a escavação foi utilizado nos taludes da lagoa. A profundidade média de escavação foi de 1,05m e todo o material retirado foi empregado na contenção da lagoa, suprimindo totalmente a necessidade de materiais para a represa da lagoa.

A natureza da escavação gerou um acabamento bastante irregular das paredes e fundo da lagoa. Irregularidades podem promover a precipitação pontual de sais, que por sua vez geram variações da temperatura que podem influenciar a eficiência e estabilidade da LCZ. O revestimento para regularização das superfícies foi feito em argila local com espessura média de 30,5 cm. Este revestimento se apresentou bastante impermeável, aprisionando água de chuvas, uma segurança extra para o revestimento e impermeabilização final da lagoa (HAUSKINS, 1987).

O revestimento final da lagoa tem a função de garantir impermeabilização e isolamento térmico. Diferentemente de várias lagoas construídas no oriente médio, com isolamento composto por camadas alternadas de argila e filme polimérico, a Gray Mountain somente utilizou uma manta “sanduíche” de polietileno clorado reforçado por duas camadas de filme plástico, com cerca de 45 mm de espessura. O revestimento foi fixado através da escavação de trincheiras em todo o perímetro do fundo da lagoa onde o isolamento foi coberto com uma camada de argila (HAUSKINS, 1987).

### **5.8.2. ESTABILIZAÇÃO DO GRADIENTE SALINO**

O processo de preenchimento da lagoa com salmoura e a posterior difusão de água fresca e estabilização do gradiente salino costuma ser um processo bastante demorado. A fim de encurtar o tempo de preparação das salmouras, as 212 toneladas de sal necessárias para a formação do gradiente da lagoa foram despejadas diretamente na lagoa. Para evitar que o despejo do sal abrasasse a camada impermeabilizante, foi instalada uma proteção composta por madeira compensada e várias camadas de lona e a lagoa foi previamente preenchida com aproximadamente 30 cm de água. A lagoa foi então preenchida com água até os 106 cm. A diluição do sal foi obtida através da circulação forçada de água em toda a lagoa com a utilização de bombas e o espalhamento mecânico e manual do sal acumulado no local de despejo. O processo de preenchimento da salmoura e diluição do sal levou dois dias. A água utilizada em todo o processo de estabilização do gradiente salino era

originária de um poço artesiano localizado à 800m da lagoa. Este poço forneceu uma vazão pequena, porém ininterrupta, considera a dimensão do projeto e dos volumes necessários. Este poço mais tarde abasteceu as 11 residências do complexo Gray Mountain.

A difusão de água doce sobre a salmoura foi realizada de acordo com o método proposto por Zangrando e lançou mão do uso de um difusor. Este difusor, como na estabilização da lagoa de Bhurj, foi elevado em ritmo cadenciado de maneira a gerar o perfil de salinidade desejado. Diferentemente de Bhurj, porém, o gradiente salino de ATRC era linear, o que simplificou o processo. A água utilizada na difusão também era proveniente do poço artesiano local e após a elevação de 30cm do nível da lagoa a elevação da temperatura da LCZ se tornou perceptível. A camada de salmoura tinha uma temperatura aproximada de 13°C logo após sua formação. Poucos dias após o início da estabilização a temperatura se elevou para 43,3°C. Essa elevação facilitou o processo de difusão da água doce e a dissolução do pouco sal que ainda não havia dissolvido. Após a formação da NCZ, água doce foi adicionada laminarmente na superfície da lagoa até o nível desejado, a 1,8m do fundo, formando assim a UCZ.

A estabilização do gradiente salino foi confirmada a partir da extração de água em 5 pontos diferentes da lagoa e em diversas profundidades diferentes. Essa água foi então pesada e evaporada para a determinação de sua concentração de sal por dois métodos diferentes, ambos confirmando que a estabilização ocorreu conforme projeto (HAUSKINS, 1987).

### **5.8.3. EXTRAÇÃO DE CALOR**

O sistema de extração de calor da lagoa de Gray Mountain consiste em um trocador de calor instalado interiormente a lagoa, onde óleo mineral age como o fluido frio e retira calor da lagoa. Esse óleo é então conduzido para um reservatório de 760L instalado dentro do prédio e devidamente isolado, onde o calor é armazenado. Quando a necessidade de aquecimento do ar é detectada pelo termostato da instalação, dois sistemas de ventilação são acionados e passam a extrair calor do reservatório de óleo. Esse sistema está representado na figura abaixo:

O trocador de calor que recolhe calor da lagoa está instalado sob a camada LCZ. A instalação de um sistema dentro da lagoa apresenta dois principais desafios: o ambiente da LCZ é bastante agressivo com materiais metálicos; a densidade bastante elevada da salmoura promove a flutuação de quaisquer equipamentos nela instalados. Para contornar essas limitações, o sistema de troca de calor foi construído inteiramente em materiais não metálicos, sendo formado por dois módulos de 16 tubos de fibra de vidro com 4,5 m de

comprimento cada e duas polegadas de diâmetro. Uma grande quantidade de sobrepesos foi aplicada sobre a base do sistema para garantir a estabilidade.

#### **5.8.4. INSTRUMENTALIZAÇÃO DA LAGOA**

Com o intuito de determinar se o funcionamento da lagoa ocorria como previsto, e em conjunto com a Estação de Engenharia Experimental da Universidade do Arizona, foi realizada a instrumentalização da lagoa. Com o auxílio de diversos sensores e um microcomputador, passou-se a monitorar a temperatura da lagoa, radiação incidente, velocidade do vento sobre a superfície e temperatura do ambiente em torno da lagoa. Entretanto, por conta de limitações orçamentárias, o período de medições e análise do desempenho térmico da lagoa se limitou ao período de 6 meses após a instalação. A instalação dos equipamentos de medição foi realizada em maio de 1983, porém o monitoramento só teve início em julho do mesmo ano, reduzindo o controle aos meses de julho, agosto e setembro. Pela falta de controle no período anterior ao monitoramento e sério descaso por parte da equipe estacionada no parque de Gray Mountain, constatou-se em julho de 1983 a evaporação de quase metade do volume da lagoa, reduzindo drasticamente as espessuras das camadas não-convectiva e convectiva superior. Essas camadas são responsáveis pelo isolamento superior da LCZ, e a alteração nessas espessuras afetou seriamente a performance da lagoa nesses meses. O nível da lagoa foi reestabelecido posteriormente pela equipe de manutenção de Gray Mountain, porém o gradiente salino inicial do sistema não foi reestabelecido.

Os dados obtidos referentes ao período anterior à perda de volume da lagoa e ao início do monitoramento, porém, eram bastante significativos e positivos. Enquanto as temperaturas da região oscilam entre 17,5 e 39°C, a temperatura da LCZ se manteve entre 47,4 e 54,8°C. Infelizmente, a perda de volume de isolamento ocorreu durante o período em que era esperado o melhor desempenho da lagoa, os meses de verão de junho, julho e agosto. A evaporação da água reduziu o isolamento da LCZ, inicialmente de 1,20m, para não mais que 25cm. As temperaturas nesse período, que se esperava que se encontrassem entre 82,2 e 98,8°C se mantiveram entre 54,3 e 57,2°C (HAUSKINS, 1987).

#### **5.8.5. CONCLUSÕES SOBRE A EXPERIÊNCIA DE GRAY MOUNTAIN**

O conceito de uma lagoa solar de gradiente salino foi considerado uma alternativa energética atraente para uma área remota como a de Gray Mountain. A produção de energia de uma instalação de tal natureza é dependente da qualidade da rotina de manutenção, o que, inevitavelmente,

incorrerá em custos adicionais no projeto. A administração de Gray Mountain fez as seguintes observações sobre sua experiência de construção e operação de uma lagoa solar de gradiente salino:

- Comprovou-se que uma lagoa salina funciona;
- A manutenção necessária por tal sistema excedia o que a unidade de Gray Mountain pôde prover;
- A falta de manutenção e evaporação descontrolada de água pode levar à serias perturbações do gradiente salino da lagoa;
- Uma vez perturbado, o gradiente salino não retornou ao seu estado inicial;
- Uma lagoa solar de gradiente salino não é um sistema de equilíbrio estável. Criada uma perturbação suficiente para mover o sistema do seu equilíbrio atual, ele se estabilizará em outra configuração. Essa característica torna necessária a monitoração da lagoa semanalmente. O perfil de temperaturas deve ser constantemente verificado como indicador do gradiente salino e o nível de água monitorado.

Com esses pontos em mente, lagoas solares não podem ser consideradas viáveis caso as seguintes condições não sejam atendidas:

- Suprimento abundante e acessível de água e sal;
- Mão-de-obra disponível e de baixo custo;
- Demanda de energia térmica de baixo nível ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ );

Caso alguma das condições acima citadas não seja presente, a ATRC não considera lagoas solares uma alternativa viável para o projeto em questão (HAUSKINS, 1987).

Durante sua operação, e apesar das falhas de projeto e manutenção que comprometeram a sua eficiência, a lagoa forneceu cerca de 600,000 BTU/h com uma redução de  $1^{\circ}\text{C}$ . Foi constatado que durante o dia a lagoa recobrava  $5^{\circ}\text{C}$  perdidos durante a noite. A partir desse valor, estimou-se a disponibilidade de calor útil da lagoa em 36,63 kW ininterruptos.

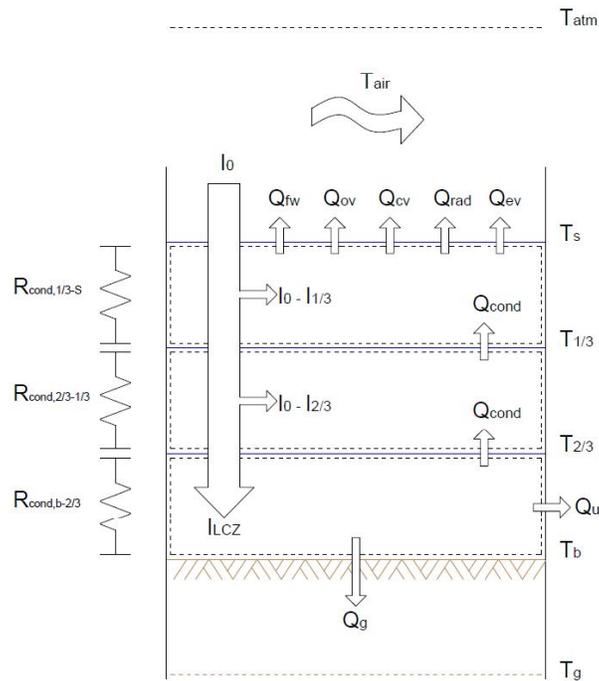
## 5.9. MODELO DE FUNCIONAMENTO

O desempenho e eficiência de uma lagoa solar estão diretamente relacionados ao dimensionamento das suas camadas e à previsão de demanda energética a ser atendida. Equações de funcionamento da lagoa, que determinem as temperaturas de operação e calor útil a partir de parâmetros ambientais e de projeto, são essenciais para a estipulação de um método padrão para o dimensionamento deste tipo de coletor solar.

A análise do sistema físico de uma lagoa solar de gradiente salino e o desenvolvimento de equações que modelem seu funcionamento foi realizada por Ibrahim Alenezi (ALENEZI, 2012) e Safwan Kanan (KANAN, 2014). Embora

ambos os estudos sejam considerados bem sucedidos e apresentado grande correlação com o funcionamento real de projetos já instalados, nenhum pode ser tido como o método padrão de análise ou dimensionamento de uma lagoa solar não convectiva.

A partir do modelo físico abaixo, foram propostas onze equações que buscam simular o funcionamento de uma lagoa solar de gradiente salino.



**Figura 19 - Sistema físico de uma lagoa solar de gradiente salino**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$T_g$  – Temperatura do solo;

$T_b$  – Temperatura do fundo da lagoa;

$T_{2/3}$  – Temperatura a 2/3 da profundidade da lagoa;

$T_{1/3}$  - Temperatura a 1/3 da profundidade da lagoa;

$T_s$  – Temperatura na superfície da lagoa;

$T_{ar}$  – Temperatura do ar;

$T_{atm}$  – Temperatura atmosférica;

$I_0$  – Radiação solar sob a superfície da lagoa;

$I_{1/3}$  – Radiação solar a 1/3 da profundidade da lagoa;

$I_{2/3}$  – Radiação solar a 2/3 da lagoa;

$I_{lcz}$  – Radiação solar no fundo da lagoa;

$Q_u$  – Calor útil;

$Q_g$  – Perda de calor para o solo;

$Q_{cond}$  – Calor transmitido entre as camadas internas da lagoa;

$Q_{cv}$  – Perda de calor pela convecção entre a superfície da lagoa e o ar;

$Q_{rad}$  – Perda de calor pela radiação do topo da lagoa;

$Q_{ev}$  – Perda de calor pela evaporação de água da superfície;

$Q_{fw}$  – Perda de calor pela adição de água fresca no sistema;

$Q_{ov}$  – Perda de calor por perturbações de vento (“overflow”);

$R_{lcz}$  – Resistência térmica da LCZ;

$R_{ncz}$  – Resistência térmica da NCZ;

$R_{ucz}$  – Resistência térmica da UCZ;

Assumindo o estado estacionário da lagoa, as equações de funcionamento são:

$$(I_{lcz} \cdot A_b) - Q_g - Q_u - Q_{cond,b-2/3} = 0 \quad (10)$$

$$Q_g - \frac{k_{iso}}{e_{iso}} \cdot A_b \cdot (T_b - T_g) = 0 \quad (11)$$

$$Q_{cond,b-2/3} - \frac{1}{R_{lcz}} \cdot (T_b - T_{2/3}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_{cond,b-2/3} + (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cond,2/3-1/3} = 0 \quad (13)$$

$$Q_{cond,2/3-1/3} - \frac{1}{R_{ncz}} \cdot (T_{2/3} - T_{1/3}) - (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b = 0 \quad (14)$$

$$Q_{cv} - h_{ar} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ar}) = 0 \quad (15)$$

$$Q_{rad} - \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{atm}^4) = 0 \quad (16)$$

$$(I_0 - I_{1/3}) \cdot A_b + Q_{cond,2/3-1/3} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0 \quad (17)$$

$$(I_{lcz} + (I_{1/3} - I_{2/3})) \cdot A_b - Q_g - Q_u - Q_{cond,2/3-1/3} = 0 \quad (18)$$

$$Q_{cond,b-2/3} + (I_0 - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0 \quad (19)$$

$$-Q_u + I_0 \cdot A_b - Q_g - Q_{sup} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} = 0 \quad (20)$$

Os parâmetros ambientais e de projeto do sistema foram definidos e apresentados, junto de seus valores e métodos de quantificação na tabela abaixo:

CONSTANTE	SIGLA	Valor	MÉTODO
Temperatura do solo	T <sub>g</sub>	19,1°C	Valores históricos – IAPAR
Temperatura do ar	T <sub>ar</sub>	24,1°C	Valores históricos – IAPAR
Temperatura atmosférica	T <sub>atm</sub>	6,53°C	Fórmula de Swinbank
Velocidade do ar na superfície	V <sub>ar</sub>	3,45 m/s	Valores históricos – IAPAR
Radiação incidente na superfície	I <sub>0</sub>	4,47 kWh/m <sup>2</sup> .dia	RadiSol2
Radiação na profundidade 1/3	I <sub>1/3</sub>	1,4850 kWh/m <sup>2</sup> .dia	Método de Bryant e Colbeck
Radiação na profundidade 2/3	I <sub>2/3</sub>	1,2371 kWh/m <sup>2</sup> .dia	Método de Bryant e Colbeck
Radiação incidente no fundo	I <sub>lcz</sub>	1,0921 kWh/m <sup>2</sup> .dia	Método de Bryant e Colbeck
Coeficiente de convecção do ar	h <sub>ar</sub>	18,81 W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>	Método de Duffie e dados históricos – IAPAR
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5,67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>	5,67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
Condutividade térmica do isolamento	k <sub>iso</sub>	0,33 W/m.K	Departamento de Física Experimental – USP/Dados do fabricante
Espessura do isolamento entre LCZ e solo	e <sub>iso</sub>	-	Dado de projeto
Pressão de vapor da água na superfície	P <sub>v.ar</sub>	0,028 atm	Instituto de Física Experimental – UFRGS

Pressão de vapor do ar sobre a lagoa	$P_{v,sup}$	0,16 atm	Lei de Dalton, Dados históricos – IAPAR
Pressão atmosférica média	$P_{atm}$	0,9 atm	Valores históricos – IAPAR
Condutividade térmica da água na UCZ	$k_{ucz}$	0,61 W/m.K	Review de correlações de Sharqway – MIT
Condutividade térmica da água na NCZ	$k_{ncz}$	0,61 W/m.K	Review de correlações de Sharqway – MIT
Condutividade térmica da água na LCZ	$k_{lcz}$	0,60 W/m.K	Review de correlações de Sharqway – MIT
Coefficiente de convecção da água na UCZ	$h_{ucz}$	100 W/m <sup>2</sup> .K	Engineering Toolbox
Coefficiente de convecção da água na LCZ	$h_{lcz}$	100 W/m <sup>2</sup> .K	Engineering Toolbox
Resistência térmica da LCZ	$R_{lcz}$	$9,9403 \times 10^{-6}$ K/W	Cálculo
Resistência térmica da NCZ	$R_{ncz}$	$1,6393 \times 10^{-3}$ K/W	Cálculo
Área da superfície da lagoa	$A_s$	-	Dado de projeto
Área do fundo da lagoa	$A_b$	-	Dado de projeto
Espessura da camada UCZ	$e_{ucz}$	-	Dado de projeto
Espessura da camada NCZ	$e_{ncz}$	-	Dado de projeto
Espessura da camada LCZ	$e_{lcz}$	-	Dado de projeto

**Tabela 1 – Parâmetros de funcionamento da lagoa solar de gradiente salino;**

**Fonte: Autoria própria.**

O desenvolvimento das equações e determinação dos parâmetros ambientais estão expostos no Apêndice I.

Uma vez que o sistema encontrado não é linear, métodos algébricos tradicionais e utilizados na maior parte de softwares “solvers”, como o método de Gauss-Jordan ou de Montante, não serão capazes de determinar os zeros das funções e gráficos das relações entre grandezas. A solução de sistemas de equações não-lineares é realizada através da utilização de métodos numéricos como o método das bissecções, aproximação linear ou o método de Newton (Biloti, 2015). Softwares de análise numérica mais sofisticados, como Mathworks MATLAB® e o software “open source” GNU Octave®, estão entre os mais utilizados com este fim.

Por conta da limitação prática, o sistema acima não pôde ser solucionado e sua correlação com outros métodos e sistemas reais verificada.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da bibliografia revista é possível obter um maior entendimento dos sistemas de lagoa solar de gradiente salino. As aplicações dessa tecnologia se mostraram variadas e tão simples quanto vantajosas.

Dos estudos das lagoas de Kutch e Gray Mountain podem-se notar alguns pontos em comum desse tipo de sistema:

- Ambas as lagoas foram dimensionadas erroneamente: a lagoa de Kutch foi sobredimensionada. Apenas 31% da sua produção de calor era suficiente para a bastecer a fábrica de laticínios para a qual foi construída. A lagoa de Gray Mountain operou de maneira satisfatória durante um curto período de tempo, antes da desestabilização do gradiente salino. A produção de calor nesse período, porém, não foi suficiente para suprir o aquecimento do galpão de manutenção à que a energia gerada pela lagoa se destinava. Um erro no dimensionamento da demanda energética condenou a eficiência do projeto.
- A manutenção do gradiente salino é tão crucial para a operação de uma lagoa quanto o seu dimensionamento e construção. O equilíbrio instável do perfil de salinidade torna necessária a verificação periódica dos níveis de água, salinidade e temperatura e o ajuste desses valores. Em ambos os projetos estudados, um fator decisivo para a suspensão das operações foi a impossibilidade dos órgãos responsáveis pelas lagoas em prover os cuidados e manutenção necessários.
- A latitude não é um fator limitante na operação e aproveitamento de lagoas solares. Tanto latitudes menores, como os 20° de Gujarat Índia, quanto os 35° de Gray Mountain no Arizona apresentaram condições ambientais propícias para esse tipo de coletor.

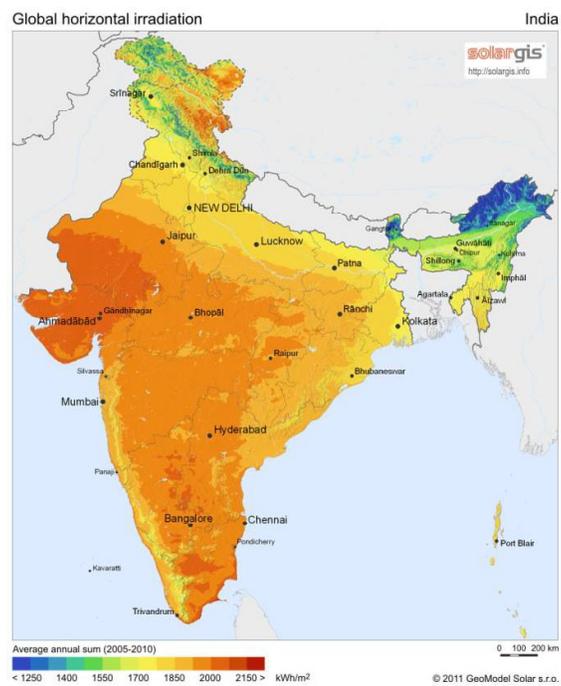
Compreensivelmente lagoas solares se desenvolveram mais em regiões como o oriente médio, Índia e o sul dos Estados Unidos. Regiões áridas com grandes extensões de terra desocupadas, altos níveis de radiação solar, pouca cobertura de nuvens e em certos casos a facilidade de obtenção de grandes quantidades de sais e argila. Entretanto, nenhum desses fatores substitui o interesse no estudo e desenvolvimento de tecnologias de energias alternativas.

O Brasil apresenta médias anuais de radiação solares comparáveis às médias das regiões acima mencionadas, como mostram as figuras abaixo, e extensão territorial bastante superior.



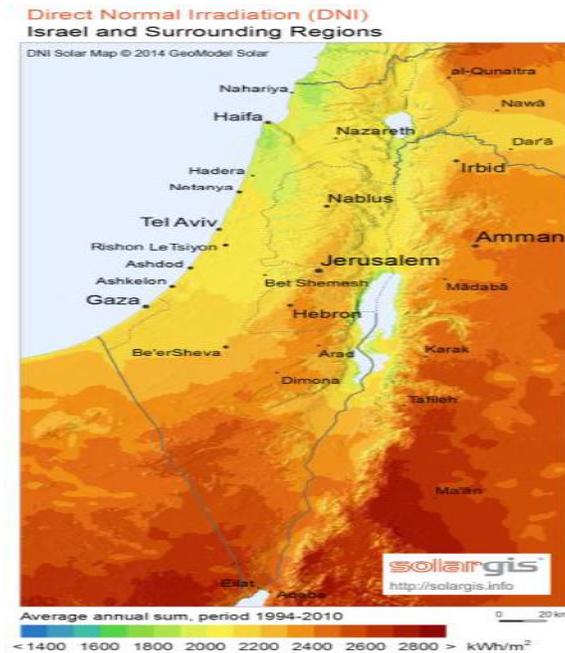
**Figura 20 - Mapa de radiação solar no Brasil**

**Fonte: SOLARGIS, 2015.**



**Figura 21 - Mapa de radiação solar da Índia**

**Fonte: SOLARGIS, 2015.**



**Figura 22 - Mapa de radiação solar de Israel**

**Fonte: SOLARGIS, 2015.**

A partir dos mapas acima, percebe-se que Israel e Índia, dois países com tradição no estudo e construção de lagoas solares, apresentam médias de insolação bastante próximas das do Brasil.

Radiação solar média (kWh/m <sup>2</sup> .ano)		
Brasil	Israel	Índia
1.900-2.000	2.100-2.300	1.850-2.000

**Tabela 2 – Radiação solar média;**

**Fonte: Autoria própria.**

Dos valores de radiação acima expostos e das dimensões e potências de saídas expostas no trabalho, é possível apresentar a seguinte relação entre áreas, potência de saída, radiação e eficiência de uma lagoa solar:

Rendimentos médios – U.S.A., Índia e Israel					
Lagoa	Área (m <sup>2</sup> )	Potência de saída (kWh/dia)	Potência de saída (kWh/dia.m <sup>2</sup> )	Radiação solar média (kWh/dia.m <sup>2</sup> )	Rendimento da radiação incidente (%)
Gray Mountain	1.047	175,84	0,16794651	5,479	3,065
Kutch Dairy	6.000	1425,6	0,2376	5,205	4,564
Beit Ha'Arava	250.000	120.000,0	0,48	6,027	7,963

**Tabela 3 – Rendimento médio de lagoas solares**

**Fonte: Autoria própria.**

Embora a variação entre os rendimentos das três lagoas comparadas no quadro acima seja relativamente grande, as falhas de manutenção e controle da lagoa de Gray Mountain e temperaturas médias inferiores às de Beit Ha'Arava, e logo perdas de calor para o ambiente maiores, explicam a disparidade. Assim, em uma simplificação, é possível estimar o rendimento de uma lagoa solar como a média dos valores acima indicados, aproximadamente 5,197%.

A produção agrícola do Brasil representa 15 a 17% do Produto Interno Bruto nacional. A cana-de-açúcar, milho, soja, feijão, café e trigo estão entre as principais culturas desenvolvidas. A secagem de todos os grãos acima listados é de vital importância na agricultura por permitir a antecipação da colheita, minimiza a perda de produto no campo e possibilita a armazenagem por períodos de tempo mais longos. A secagem desses grãos pode ser feita de maneira natural ou auxiliada pelo homem, para a obtenção de um teor de umidade menor em um período de tempo mais curto. Esse processo de secagem artificial requer a ventilação forçada de ar aquecido em pouco mais de 10°C acima da temperatura ambiente (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2015).

Como foi possível observar durante o trabalho, sistemas de lagoas solares similares ao de Gray Mountain podem fornecer calor ao ar em quantidades utilizáveis pela agricultura mesmo em situações ambientais pouco favoráveis. Na safra de 2014/2015 foram produzidas 200,7 milhões de toneladas de grãos no Brasil, dos quais a imensa maioria passou pelo processo de secagem. O imenso volume de grãos produzidos ilustra o grande potencial de aplicação de lagoas solares na indústria brasileira.

## 7. CONCLUSÕES

Os estudos de Alenezi, a modelagem teórica de uma lagoa solar e sua integração com dessalinização (ALENEZI, 2012), e de Huanmin, experimentação de um sistema de dessalinização MSF abastecido por uma lagoa solar (HUANMIN, 2004), indicam o ressurgimento de interesse nessa tecnologia, tão estudada e utilizada nas décadas de 80 e 90.

Um foco de novas pesquisas está na determinação de um método padrão para o dimensionamento e projeto de lagoas solares. Outro foco é a utilização de lagoas solares como fonte de energia térmica em processos industriais ou agropecuários. O estudo de sistemas de dessalinização auxiliada por lagoas solares reflete os principais processos que demandam energia térmica de baixa temperatura das regiões dos autores. Entretanto, essa tecnologia pode ser aplicada em uma infinidade de processos industriais e agrícolas, ainda somente sugeridos em trabalhos teóricos.

No Brasil essa tecnologia ainda é pouco conhecida, são poucos os estudos de divulgação ou viabilidade desses sistemas e ainda nenhum teste foi realizado. Entretanto, como apresentado, o potencial desse tipo de coletor solar tem poucas limitações inerentes e uma perspectiva de crescimento bastante grande.

Espera-se ter cumprido, através da revisão da bibliografia existente e análise de projetos bem-sucedidos e documentados, o objetivo do trabalho de divulgar a tecnologia das lagoas solares de gradiente salino, apresentado suas principais características e aplicações, e produzindo um paralelo entre as características ambientais do Brasil que tornam lagoas solares uma opção viável e bastante atraente para aplicações agrícolas e industriais desenvolvidas aqui.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros que venham a abordar o tema sugere-se a o estudo das equações que regem o funcionamento da lagoa, análise das hipóteses simplificadoras adotadas e solução com o auxílio de softwares de análise numérica. Seria também interessante o estudo da utilização de lagoas solares como fonte de energia em processos agrícolas e industriais como a secagem de grãos e processamento da cana-de-açúcar e produção de farinhas. A análise da viabilidade técnica e econômica e do rendimento deste tipo de sistema pode vir a impulsionar a utilização de lagoas solares no Brasil.

## 9. REFERÊNCIAS

AERBRAX POWER. **Energia Solar**. Disponível em <[http://www.aerbraxpower.com.br/energia\\_solar.html](http://www.aerbraxpower.com.br/energia_solar.html)>. Acesso em 27 Abr. 2012.

ALENEZI, Ibrahim. **SALINITY GRADIENT SOLAR PONDS: THEORETICAL MODELLING AND INTEGRATION WITH DESALINATION**. 2012. f. 203. Tese. Doutorado em Engenharia Química – Faculty of Engineering and Physical Sciences. University of Surrey. Guildford. England.

AMBIENTE ENERGIA. **“2012 será o ano da energia solar fotovoltaica no Brasil?”** Disponível em <<http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/04/2012-sera-o-ano-da-energia-solar-fotovoltaica-no-brasil/18636>>. Acesso em 20 Mai. 2012.

ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 17 ago. 2012. Disponível em [www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf). Acesso em: 19. Fev. 2013.

BILOTI, Ricardo. **MÉTODOS PARA EQUAÇÕES NÃO LINEARES**. Material de sala de aula. Cálculo Numérico. UNICAMP. 2º Sem. 2015. Digital.

BOWEN, Ira Sprague. **THE RATIO OF HEAT LOSSES BY CONDUCTION AND BY EVAPORATION FROM ANY WATER SURFACE**. Physical Review, Vol. 27, 1º Sem. 1926. pp 779-787.

CALVER, Ann; FINCH, Jon. **METHODS FOR THE QUANTIFICATION OF EVAPORATION FROM LAKES**. World Meteorological Organization's Commission for Hydrology, 2º Sem. 2008.

CAMPOS, Mayara Soares. **PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA VARIAÇÃO DA DIREÇÃO DE INCIDÊNCIA DOS RAIOS SOLARES AO LONGO DO ANO**. XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 2º Sem. 2013.

CARTA MAIOR. **ENERGIA SOLAR: DO COLONIALISMO À MODERNIDADE.** Disponível em: <<http://cartamaior.com.br/?/Editoria/Meio-Ambiente/Energia-solar-do-colonialismo-a-modernidade/3/33701>>. Acesso em 10 Set. 2015

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.** Disponível em <[http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial\\_solar](http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_solar)>. Acesso em 27 Abr. 2012.

DUTTON, Frederic B. **DANTON'S LAW OF PARTIAL PRESSURES.** Journal of Chemical Education, Vol. 38 (8), 2º Sem. 1961, pp. A545.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2011.** Disponível em: <[http://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2011.pdf](http://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf)>. Acesso em 24 Mai. 2014.

GALVANI, Emerson. **RELAÇÕES ASTRONÔMICAS TERRA-SOL.** Material de sala de aula. Climatologia I. USP. 2º Sem. 2015. Digital.

GTES - GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CRESESB, 2004.

HAUSKINS, John B. Jr.; MANCINI, Frank; KOLAJA, Rudolf. **ARIZONA'S SALT GRADIENT SOLAR POND.** ARIZONA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1987. f. 37. (DOT, Boletim Técnico FHWA-AZ87-179, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration).

HAY KHALIL, R. A.; JUBRAN, B. A.; FAQIR, N. M. **OPTIMIZATION OF SOLAR POND ELECTRICAL POWER GENERATION SYSTEM.** Energy Convers., Vol. 38, No. 8, 1997, pp. 787-798.

HONSBURG, Christiana; BOWDEN, Stuart. **PV CDROM.** Disponível em <<http://www.pveducation.org/pvcdrom>>. Acesso em: 20 Abr. 2014.

HUANMIN, Lu; WALTON, John C., HEIN, Herbert. **THERMAL DESALINATION USING MEMS AND SALINITY-GRADIENT SOLAR POND TECHNOLOGY.** U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, 202. f. 45. (Boletim Técnico 80, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Desalination Research and Development Program ).

IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná. Disponível em: <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Ponta\\_Grossa.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm)>. Acesso em Nov. 2015

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_impresao.php?id\\_noticia=1272](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_impresao.php?id_noticia=1272)>. Acesso em 23 Mai. 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=410690>>. Acesso em 17. Mar. 2015.

INCROPERA, Frank P. **FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER**. 6th ed. 2008.

IF-UFRGS, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **CILCO DE CARNOT**. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo\\_carnot.htm](http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_carnot.htm)> Acesso em 10. Set. 2015

KALOGIROU, Soteris. **SOLAR ENERGY ENGINEERING**. 1st ed. 2009, pp. 1-48; 723-735.

KANAN, Safwan; DEWSBURY, Jonathan; LANE-SERFF, Gregory. **A SIMPLE HEAT AND MASS TRANSFER MODEL FOR SALT GRADIENT SOLAR PONDS**. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, Vol. 8, No. 1, 2014.

KRÖGER, D. G.; BRANFIELD, G. R. **EVAPORATION FROM A WATER SURFACE: THEORY AND EXPERIMENT**. R&D Journal, No. 23, 2007.

KUMAR, Amit; KISHORE, V. V. N. **CONSTRUCTION AND OPERATIONAL EXPERIENCE OF A 6000 m<sup>2</sup> SOLAR POND AT KUTCH, INDIA**. Solar Energy, Vol. 65, Parte 4, 1<sup>o</sup> Sem. 1999, pp. 237-249.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **PRODUTO INTERNO DA AGROPECUÁRIA DEVE SER DE R\$ 1,1 TRILHÃO**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2014/12/produto-interno-bruto-da-agropecuaria-deve-ser-de-rs-1-trilhao>> Acesso em: 10. Set. 2015

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **CONSÓRCIO DIVULGA TECNOLOGIAS NA SEMANA DO FAZENDEIRO**. Disponível em: <

<http://www.agricultura.gov.br/comunicacao/noticias/2012/07/consorcio-divulga-tecnologias-na-semana-do-fazendeiro>> Acesso em: 10. Set. 2015

PHYSICAL GEOGRAPHY. Disponível em: <<http://www.physicalgeography.net>>. Acesso em 05. Dez. 2015.

PORTAL SOLAR. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br>> Acesso em : 05. Dez. 2015.

PVCDROM. Disponível em: <<http://www.pveducation.org/pvcdrom>>. Acesso em 12 Dez. 2012.

RAFFERTY, Kevin. **POND HEAT LOSS**. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 9, No. 4, 1º Sem. 1986.

RADIASOL 2 – Software para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Disponível em <http://www.solar.ufrgs.br/#radiasol>. Acesso em 30 Ago. 2015.

REF – Centro de Referência para o Ensino de Física, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=523>>. Acesso em 12. Mar. 2015.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA**. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=100>>. Acesso em 10. Out. 2015

SHAH, Syed A.; SHORT, Ted H.; FYNN, Peter R. **MODELING AND TESTING A SALT GRADIENT SOLAR POND IN NORTHEAST OHIO**. Solar Energy, Vol. 27. 1981, pp. 395-401.

SHARQAWY, Mostafa H.; LIENHARD V, John H.; ZUBAIR, Syed M. **THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SEAWATER: A REVIEW OF EXISTING CORRELATIONS AND DATA**. Desalination and Water Treatment, No. 16. 1º Sem. 2010, pp. 354-380. Disponível em <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/69157>>. Acesso em 16 Set. 2015.

SOLARGIS. Disponível em: < <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em 2 Out. 2015

SOUTHWEST THERMAL TECHNOLOGY INC. Disponível em <<http://www.southwestthermal.com/shell-tube-exchanger.html>>. Acesso em 10 Set. 2015

SRINIVASAN, J. **SOLAR POND TECHNOLOGY**. Sādhanā, Vol. 18, Parte 1, 1º Sem. 1993, pp. 39-55.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2006 Revision**. Disponível em: <[http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/WPP2006\\_Highlights\\_rev.pdf](http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/WPP2006_Highlights_rev.pdf)>. Acesso em 23 Mai. 2012.

UTEP – UNIVERSITY OF TEXAS AT EL PASO. Disponível em: <<http://www.ece.utep.edu/research/Energy/Pond/>> Acesso em 10. Nov. 2015

U.S. Energy Information Administration – U.S. E.I.A. Disponível em <<http://www.eia.gov/>> Acesso em 20 Mai. 2012.

WALKER, Charlotte Elizabeth. **ANALYSIS OF POWER GENERATION SYSTEM UTILIZING A SALT GRADIENT SOLAR POND**. University of Tennessee Honors Thesis Projects. 1º Sem. 2001. Disponível em: <[http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1499&context=utk\\_chanhonoproj](http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1499&context=utk_chanhonoproj)> Acesso em 23 Set. 2015.

WILLIAMS, Gaynor Phillips. **HEAT TRANSFER COEFFICIENTS FOR NATURAL WATER SURFACES**. National Research Council Canada, Division of Building Research, No. 202, 1963.

WORLD ENERGY COUNCIL. Disponível em: <<http://www.worldenergy.org/>>. Acesso em 24 Mai. 2012.



## APENDICE I

### PROPOSIÇÃO

As lagoas solares de gradiente salino, por sua simplicidade e baixos custos em sua implementação, manutenção e operação, se apresentam como alternativas energéticas viáveis e atraentes para a agricultura, sendo também utilizadas atualmente como unidades de dessalinização e geração de energia. Entretanto, lagoas solares ainda estão longe de serem consideradas tecnologias difundidas no Brasil, não havendo registros de utilização em escala comercial ou ainda de protótipos em funcionamento. Este fato pode ser atribuído à falta de estudos e divulgação deste sistema no Brasil, bem como ao ainda não haverem métodos estruturados, testados e difundidos de dimensionamento e instalação destes coletores.

Na sequência será estudado o comportamento térmico da lagoa no estado estacionário, ou seja, quando o processo de aquecimento da lagoa já tiver sido finalizado e já estiverem instaladas as temperaturas de operação. Assim, busca-se encontrar para um modelo teórico de geometria arbitrada e condições ambientais da região de Curitiba-PR.

### MATERIAIS E MÉTODOS

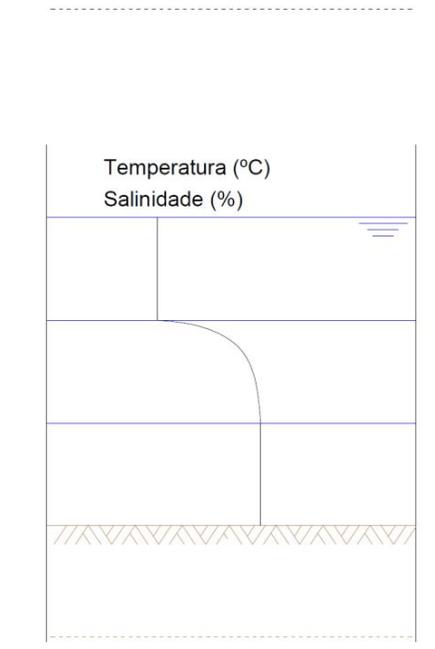
O objetivo da modelagem matemática de uma lagoa solar é compreender melhor as relações entre as diferentes grandezas e características que ditam o seu comportamento, sua capacidade de retenção de calor, suas perdas para o ambiente e eficiência. Nesta análise parte-se do pressuposto que um conjunto de equações linearmente independentes que igualem em quantidade os graus de liberdade do sistema constitui uma solução para o sistema.

O modelo sugerido utiliza algumas hipóteses para a simulação da lagoa e sua solução, dentre elas:

- As variações horizontais de temperatura e são consideradas desprezíveis, logo as distribuições de calor e salinidade são unidimensionais;
- A temperatura e densidade nas camadas UCZ e LCZ são uniformes;
- Embora a concentração ideal de sal nas camadas da lagoa varie em função das temperaturas de funcionamento, um valor de referência encontrado na bibliografia de referência é uma concentração de 30% em massa na LCZ e 0-2% na UCZ. Assim, as concentrações na lagoa e a condutividade térmica da água nas suas diferentes camadas será considerada constante e conhecida.

## Equilíbrio térmico na LCZ

A configuração mais simples, e mais amplamente utilizada, de uma lagoa solar é representada pela figura a seguir:

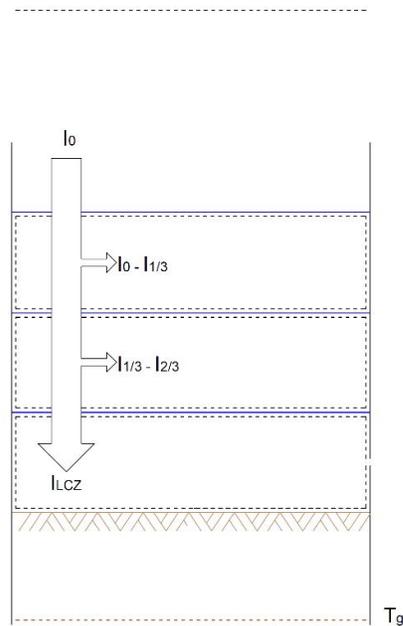


**Figura 23- Perfil de temperatura e salinidade**

**Fonte:** Autoria própria.

A lagoa solar de gradiente salino é o coletor solar de constituição mais simples, sendo formado por três camadas de água de diferentes graus de salinidade. As diferentes concentrações de sal conferem diferentes massas específicas aos volumes de água, tornando o sistema heterogêneo, sendo a camada inferior significativamente mais densa que as superiores. Este incremento na densidade da água conferido pela alta concentração de sal possibilita que altas temperaturas, próximas à 95° C em situações ideais, sejam mantidas na região inferior da lagoa.

Como qualquer outro coletor solar térmico, o comportamento térmico e a eficiência de uma lagoa solar podem ser definidos através da comparação entre a radiação recebida, o calor absorvido, as perdas energéticas e o calor útil disponível para extração e conversão. Neste modelo, considera-se que não há energia recebida através de radiação de ondas longas, sendo a radiação recebida a seguinte:



**Figura 24 - Radiação na lagoa**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$I_0$  - Radiação solar na superfície da lagoa ( $W/m^2$ )

$I_{1/3}$  - Radiação solar que alcança 1/3 da profundidade da lagoa ( $W/m^2$ )

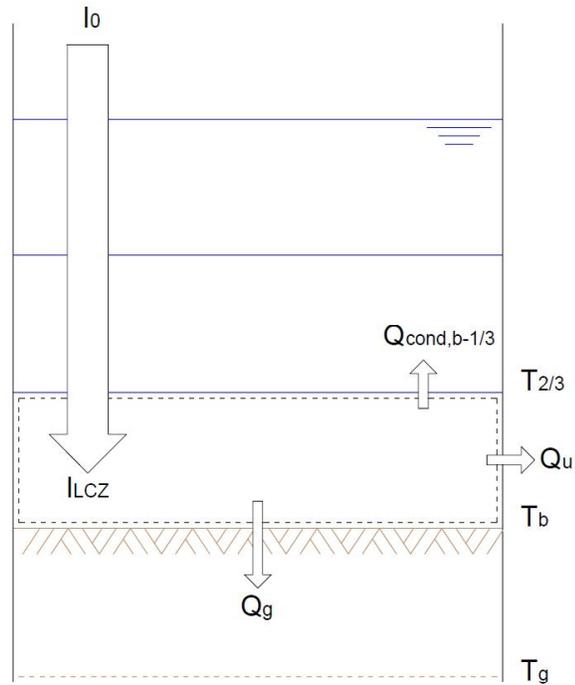
$I_{2/3}$  - Radiação solar que alcança 2/3 da profundidade da lagoa ( $W/m^2$ )

$I_{LCZ}$  - Radiação que atinge o fundo da lagoa ( $W/m^2$ )

A radiação solar que consegue alcançar as diferentes profundidades da lagoa pode ser calculada através da equação de Bryant and Colbeck (1977). Considera-se que a diferença entre  $I_0$  e  $I_{1/3}$  ou  $I_{2/3}$  é a energia que interage com a água, pelo que as diferenças  $(I_0 - I_{1/3})$  e  $(I_0 - I_{2/3})$  são contabilizadas como entrada de energia nas camadas não convectiva e convectiva superior.

O princípio de funcionamento da lagoa de gradiente salino é a interrupção do transporte de massa e energia por convecção através da diferença de densidade das diferentes camadas da lagoa.

Ainda que exista o transporte de energia tanto por condução, convecção e radiação dentro da LCZ, o balanço energético da camada ocorre após o equilíbrio térmico, motivo pelo qual será considerada somente a perda de calor por condução para a camada superior da lagoa. A representação gráfica do balanço energético da LCZ é a seguinte:



**Figura 25 - Equilíbrio térmico na LCZ**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$I_{LCZ}$  - Radiação que atinge o fundo da lagoa

$Q_u$  - Calor útil

$Q_g$  - Calor perdido por condução para o solo

$Q_{\text{cond},b-2/3}$  - Calor perdido por condução para a camada NCZ.

As equações desse sistema são:

$$Q_u = I_{lcz} \cdot A_b - Q_g - Q_{cond_{b-2/3}}$$

$$Q_{cond_{b-2/3}} = \frac{K_{lcz} \cdot A_{2/3} \cdot (T_b - T_{2/3})}{e_{lcz}}$$

$$Q_g = \frac{K_{iso} \cdot A_b \cdot (T_b - T_s)}{K_{iso}}$$

Onde:

$K_{lcz}$  = condutividade térmica da camada limite entre LCZ e NCZ

$e_{lcz}$  = espessura considerada para a camada limite entre LCZ e NCZ

$K_{iso}$  = condutividade térmica do isolamento entre LCZ e o solo

$H_{iso}$  = espessura do isolamento entre LCZ e o solo

$A_{2/3}$  = área de contato das camadas LCZ e NCZ

$A_b$  = área do fundo da lagoa

$T_b$  = Temperatura do fundo da lagoa

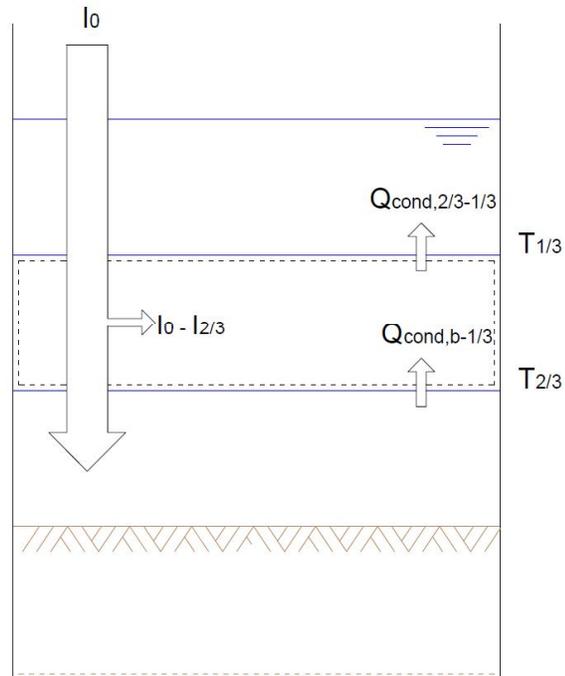
$T_{2/3}$  = Temperatura do limite inferior da camada NCZ

Entende-se que a transferência de calor entre as camadas limite da LCZ e NCZ não se dá somente através de condução e que existe um pequeno fluxo de massa, uma convecção local, entre as duas zonas. Entretanto, considera-se que a influência deste fluxo é desprezível para os fins deste trabalho, uma vez que os volumes de água retidos através do gradiente salino excedem a transferência em algumas ordens de grandeza. Por este motivo, a condução de energia entre a “fonte de calor”, fundo da lagoa, e a camada superior foi aproximada pela lei de Fourier considerando o volume da LCZ como a espessura de “parede à parede” (INCROPERA,2008).

O artigo “The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data” publicado pelo Instituto de Tecnologia do Massachusetts lista os principais métodos para determinar o coeficiente de condução térmica da água como função de sua salinidade (SHARQAWY, 2010).

### **Equilíbrio térmico na NCZ**

O equilíbrio térmico da camada Non-Convecting Zone, NCZ, pode ser representado pelo seguinte sistema:



**Figura 26 - Equilíbrio térmico na NCZ**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$Q_{cond,b-2/3}$  – Calor recebido por condução da camada NCZ.

$Q_{cond,2/3-1/3}$  – Calor transferido por condução para a camada UCZ.

$I_0 - I_{2/3}$  – Calor recebido através da radiação solar.

As equações desse sistema são:

$$Q_{cond_{2/3-1/3}} = Q_{cond_{b-2/3}} + (I_0 - I_{2/3})$$

$$Q_{cond_{b-2/3}} = \frac{K_{lcz} \cdot A_b \cdot (T_b - T_{2/3})}{h_{lcz}}$$

$$\frac{I_x}{I_0} = \left\{ 0,36 - 0,08 \cdot \ln\left(\frac{x}{\cos \theta_r}\right) \right\}$$

Onde:

$I_0$  - Radiação solar na superfície da lagoa ( $W/m^2$ )

$I_{2/3}$  - Radiação solar que alcança 2/3 da profundidade da lagoa ( $W/m^2$ )

$I_x$  - Radiação solar que alcança a profundidade  $x$

$X$  - profundidade (m)

$\theta_r$  - ângulo de refração na superfície da lagoa (rad)

O ângulo de refração  $\theta_r$  pode ser calculado através da Lei de Snell.

Considerando que a condução de calor dentro da NCZ também obedece a Lei de Fourier, pode-se escrever  $Q_{cond,2/3-1/3}$  da seguinte maneira:

$$Q_{cond,2/3-1/3} = \frac{K_{ncz} \cdot A_{ncz} \cdot (T_{2/3} - T_{1/3})}{h_{ncz}}$$

### Equilíbrio térmico na UCZ

O equilíbrio térmico da camada superior é representado pelo seguinte sistema:

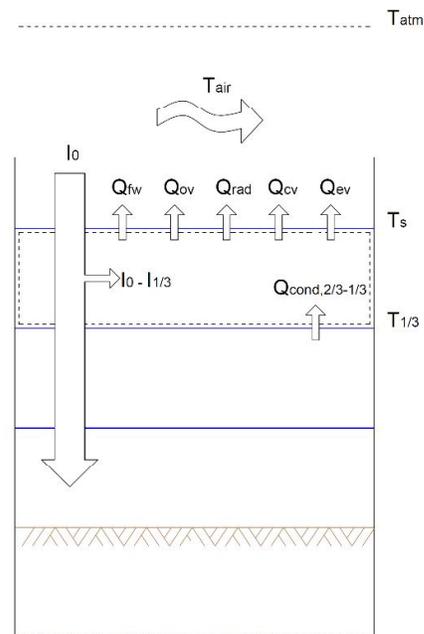


Figura 27 - Equilíbrio térmico na UCZ

Fonte: Autoria própria.

Onde:

$Q_{cond,2/3-1/3}$  – Calor recebido por condução da camada NCZ

$Q_{ev}$  – Calor perdido através da evaporação da água da UCZ.

$Q_{rad}$  – Calor perdido para a atmosfera por radiação.

$Q_{cv}$  – Calor perdido para a atmosfera por convecção.

$Q_{ov}$  – Calor perdido pelas perdas de água da UCZ por perturbações criadas pelo vento (overflow).

$Q_{fw}$  – Calor perdido pela adição de água fresca para manter o nível da lagoa.

$I_0 - I_{1/3}$  – Calor recebido através da radiação solar.

Nas condições ideais de funcionamento, a temperatura  $T_s$  é bastante próxima da  $T_{ar}$  e  $T_{atm}$ , para minimizar as perdas  $Q_{ev}$ ,  $Q_{cond}$  e  $Q_{rad}$ , minimizando também a necessidade de adição de água fresca para manter o nível da lagoa. Apesar de a adição de água nunca se tornar completamente desnecessária, podemos considerá-la pequena ou suficiente para não afetar o regime térmico do sistema.

Apesar de a grande maioria das lagoas solares em atividade serem localizadas em ambientes áridos ou em fazendas, locais com pouca proteção disponível contra o vento, durante o planejamento da implantação de um projeto de uma lagoa este tipo de proteção deve ser levado em conta. A perda de calor  $Q_{ov}$  será considerada desprezível pela possibilidade de se minimizar as fugas e perdas de água da UCZ pelas perturbações geradas pelo vento, e pela temperatura da superfície ser bastante próxima da temperatura do ar.

O calor  $Q_{cond,2/3-1/3}$  pode ser calculado pela equação já exposta na análise da NCZ.

Assim, as equações do equilíbrio térmico da UCZ serão:

$$Q_{cond_{\frac{1}{3}-s}} = Q_{cond_{\frac{2}{3}-\frac{1}{3}}} + \left( I_0 - I_{\frac{1}{3}} \right)$$

$$Q_{rad} = \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{atm}^4)$$

$$Q_{cv} = (1 + 0,225 \cdot v) \cdot A \cdot (T_s - T_{air})$$

$$Q_{ev} = \frac{Q_{cv}}{R}$$

Onde:

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

A – Área de superfície do corpo d'água.

$T_{atm}$  – Temperatura atmosférica.

V – Coeficiente de transferência térmica de convecção.

$T_{air}$  – Temperatura do ar que circula sobre o corpo d'água.

O calor perdido através da evaporação da camada superficial do corpo de água é quantificado pela equação (n), onde a razão entre a convecção e evaporação R é determinada pela seguinte fórmula (Bowen, 1926):

$$R = 0,46 \cdot \left( \frac{T_s - T_{ar}}{P_{v,sup} - P_{v,ar}} \right) \cdot \frac{P}{760}$$

Onde:

$T_s$  – Temperatura da superfície do corpo d'água.

$T_{ar}$  – Temperatura do ar que circula sobre o corpo d'água.

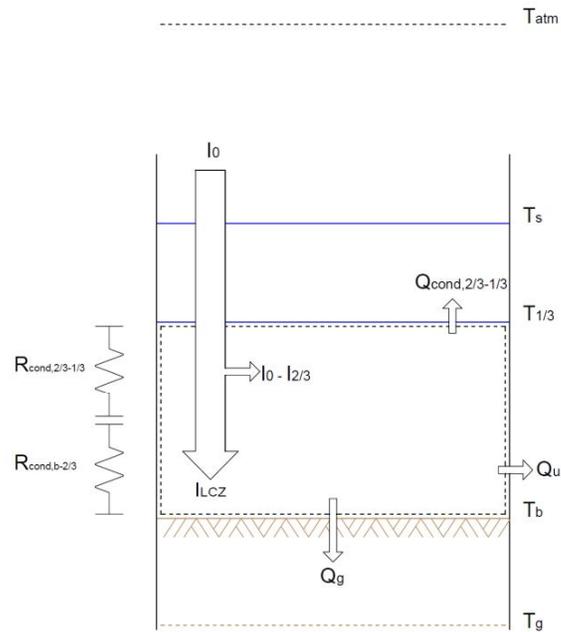
$P_{v,sup}$  – Pressão de vapor da superfície do corpo d'água.

$P_{v,ar}$  – Pressão de vapor do ar que circula sobre o corpo d'água.

P – Pressão atmosférica em milímetros de mercúrio.

### **Equilíbrio térmico na LCZ+NCZ**

Uma vez que a lagoa se encontrar no regime permanente, é possível ignorar as trocas de calor entre a LCZ e NCZ e analisar o conjunto dos dois sistemas como um único, analisando a entrada e saída de energia e desconsiderando as suas diferentes composições. O equilíbrio térmico nessa região é representado pelo seguinte sistema:



**Figura 28 - Equilíbrio térmico na zona LCZ+NCZ**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$Q_g$  – Calor perdido por condução para o solo.

$Q_{cond,2/3-1/3}$  – Calor transferido por condução para a UCZ.

$Q_u$  – Calor útil.

$I_0 - I_{2/3}$  – Calor recebido através da radiação solar.

$I_{LCZ}$  – Calor recebido através da radiação solar.

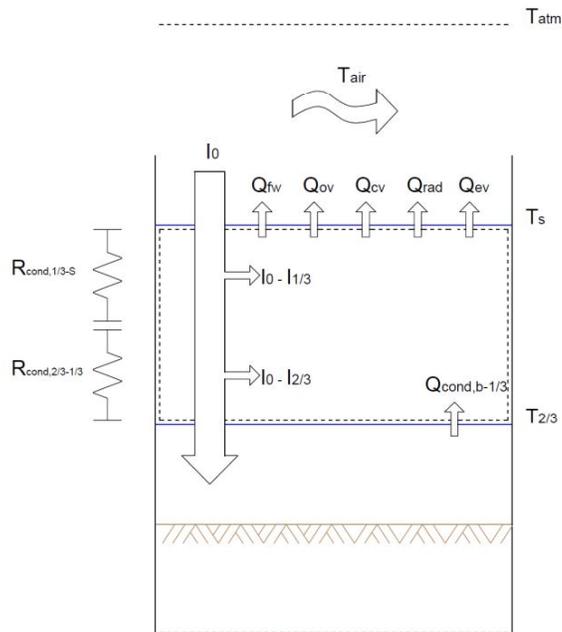
Assim, é possível escrever:

$$Q_u = I_0 - I_{2/3} + I_{LCZ} - Q_g - Q_{cond, \frac{2}{3}-\frac{1}{3}} \quad (20)$$

### **Equilíbrio térmico na NCZ+UCZ**

Da mesma forma, para a análise do comportamento térmico da lagoa, as transferências de calor entre NCZ e UCZ serão desconsideradas para analisar

o conjunto dos dois sistemas como um único. O equilíbrio térmico nessa nova região é representado pelo seguinte sistema:



**Figura 29 - Equilíbrio térmico na NCZ+UCZ**

**Fonte: Autoria própria.**

Onde:

$Q_{cond,b-2/3}$  – Calor recebido por condução da camada LCZ

$Q_{ev}$  – Calor perdido através da evaporação da água da UCZ.

$Q_{rad}$  – Calor perdido para a atmosfera por radiação.

$Q_{cv}$  – Calor perdido para a atmosfera por convecção.

$Q_{ov}$  – Calor perdido pelas perdas de água da UCZ por perturbações criadas pelo vento (overflow).

$Q_{fw}$  – Calor perdido pela adição de água fresca para manter o nível da lagoa.

$I_0 - I_{1/3}$  – Calor recebido através da radiação solar.

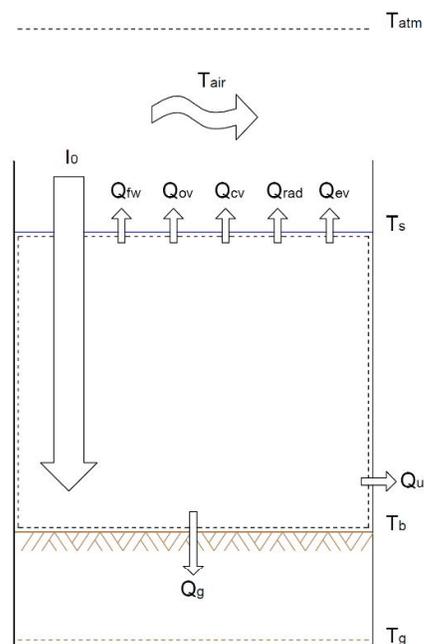
$I_0 - I_{2/3}$  – Calor recebido através da radiação solar.

Do equilíbrio térmico no regime permanente desta região, podemos escrever:

$$Q_{cond} + (I_0 - I_{1/3}) + (I_0 - I_{2/3}) - Q_{fw} - Q_{ov} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} = 0 \quad (21)$$

### Equilíbrio térmico na LCZ+NCZ+UCZ

É possível, também, estudar somente as trocas de calor entre o corpo da lagoa e o ambiente, ignorando sua formação heterogênea e trocas de calor internas. Assim, temos o seguinte sistema:



**Figura 30 - Equilíbrio térmico na lagoa solar**

Fonte: Autoria própria.

Onde:

$Q_u$  – Calor útil.

$Q_g$  – Calor perdido por condução para o solo.

$Q_{ev}$  – Calor perdido através da evaporação da água da UCZ.

$Q_{rad}$  – Calor perdido para a atmosfera por radiação.

$Q_{cv}$  – Calor perdido para a atmosfera por convecção.

$Q_{ov}$  – Calor perdido pelas perdas de água da UCZ por perturbações criadas pelo vento (overflow).

$Q_{fw}$  – Calor perdido pela adição de água fresca para manter o nível da lagoa.

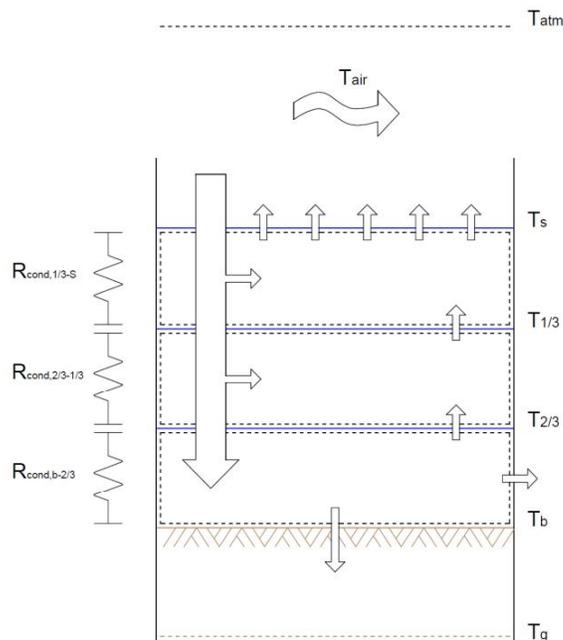
$I_0$  – Calor recebido através da radiação solar.

Assim, é possível escrever:

$$Q_u = I_0 - Q_q - Q_{fw} - Q_{ov} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} \quad (22)$$

### Análise das temperaturas internas da lagoa solar.

A análise acima descrita considera quatro diferentes temperaturas na lagoa solar, cada uma função da sua profundidade e concentração salina, e depende também das temperaturas do solo, ar que circula sobre a superfície da água e atmosférica, de acordo com a seguinte representação:



**Figura 31 - Temperaturas internas da lagoa solar**

**Fonte: Autoria própria.**

As temperaturas indicadas são:

$T_b$  – Temperatura do fundo da lagoa, desconhecida.

$T_{2/3}$  – Temperatura a 2/3 da profundidade total da lagoa, desconhecida.

$T_{1/3}$  – Temperatura a 1/3 da profundidade total da lagoa, desconhecida.

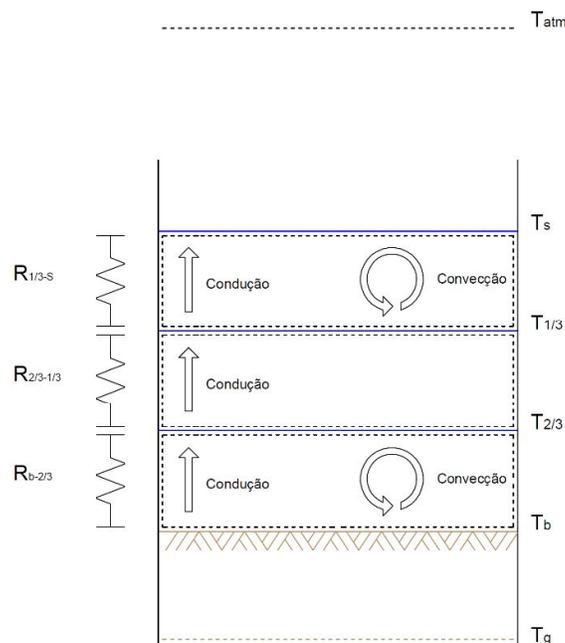
$T_s$  – Temperatura da superfície da lagoa, desconhecida.

$T_g$  – Temperatura do solo em torno da lagoa, conhecida.

$T_{air}$  – Temperatura do ar que circula a lagoa, conhecida.

$T_{atm}$  – Temperatura atmosférica, conhecida.

O funcionamento da concentração de calor da lagoa se baseia na baixa transmissão de calor através de condução na água. O gradiente de salinidade da lagoa e as diferentes massas específicas entre LCZ, NCZ e UCZ impedem a convecção na camada intermediária (figura 31) e limita a transferência de energia nessa região à condução, bastante reduzida devido ao pequeno coeficiente de transmissão de calor da substância.



**Figura 32 - Sistema de resistências térmicas**

**Fonte: Autoria própria.**

Analogamente à Lei de Ohm, é possível escrever para trocas de calor em geral:

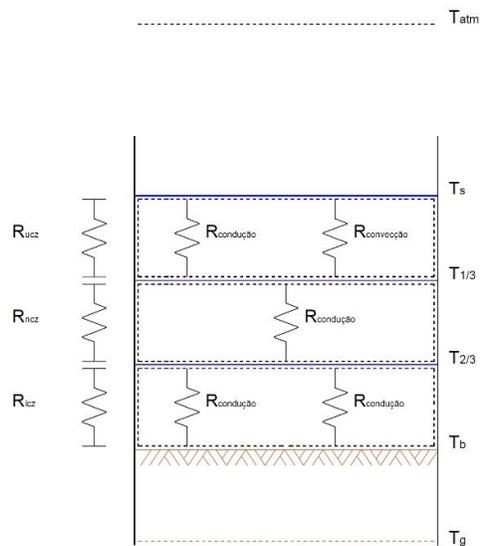
$$q = R \cdot \Delta T$$

Onde:

$q$  – Transferência de calor;

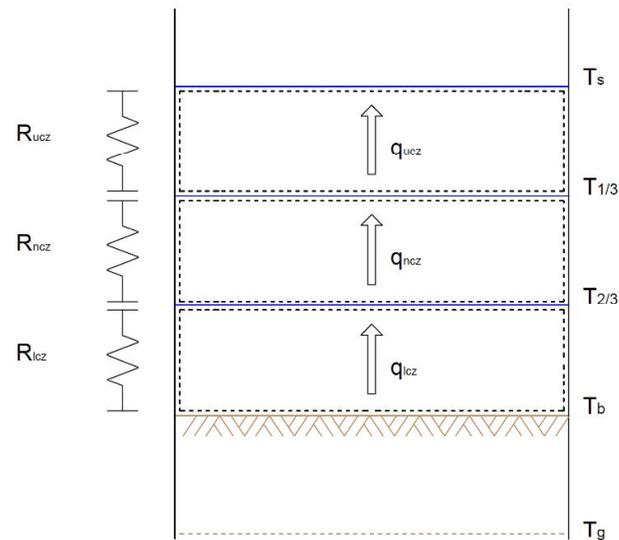
$R$  – Resistência térmica;

$\Delta T$  – Diferença de temperatura;



**Figura 33 - Sistema de resistências térmicas**

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 34 - Resistências equivalentes e fluxo de calor**

Fonte: Autoria própria.

As resistências indicadas nas imagens 32 e 33 representam as resistências associadas à cada tipo de transferência de calor e à cada camada do coletor. Essas resistências são:

$$R_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A}$$

$$R_{conv} = \frac{T_1 - T_2}{q} = \frac{1}{h \cdot A}$$

Novamente utilizando a analogia à elétrica, encontra-se as resistências equivalentes de cada zona:

$$\frac{1}{R_{lcz}} = \frac{1}{R_{cond}} + \frac{1}{R_{cv}} = \frac{1}{\frac{e_{lcz}}{k_{lcz} \cdot A}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{lcz} \cdot A}}$$

$$R_{ncz} = R_{cond} = \frac{e_{ncz}}{k_{ncz} \cdot A}$$

$$\frac{1}{R_{ucz}} = \frac{1}{R_{cond}} + \frac{1}{R_{cv}} = \frac{1}{\frac{e_{ucz}}{k_{ucz} \cdot A}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{ucz} \cdot A}}$$

Aplicando esse conceito à lagoa solar obtemos as seguintes equações:

$$q_{lcz} = R_{lcz} \cdot (T_b - T_{2/3}) = Q_{cond,b-2/3}$$

$$q_{ncz} = R_{ncz} \cdot (T_{2/3} - T_{1/3}) = Q_{cond,2/3-1/3}$$

$$q_{ucz} = R_{ucz} \cdot (T_{1/3} - T_s) = Q_{cond,1/3-s}$$

Onde;

$R_{lcz}$  – Resistência térmica da camada LCZ;

$R_{ncz}$  – Resistência térmica da camada NCZ;

$R_{ucz}$  – Resistência térmica da camada UCZ;

$q_{lcz}$  – Fluxo de calor pela camada LCZ;

$q_{ncz}$  – Fluxo de calor pela camada NCZ;

$q_{ucz}$  – Fluxo de calor pela camada UCZ;

$e_{lcz}$  – Espessura da camada LCZ;

$e_{ncz}$  - Espessura da camada NCZ;

$e_{ucz}$  - Espessura da camada UCZ;

$k_{lcz}$  – Condutividade térmica da água na camada LCZ;

$k_{ncz}$  - Condutividade térmica da água na camada NCZ;

$k_{ucz}$  - Condutividade térmica da água na camada UCZ;

$h_{lcz}$  – Coeficiente de convecção da água na camada LCZ;

$h_{ucz}$  - Coeficiente de convecção da água na camada UCZ;

Um dos pressupostos deste trabalho é a não formação de convecção na camada intermediária da lagoa, enquanto as camadas UCZ e LCZ desenvolvem correntes convectivas livremente. As resistências térmicas dessas camadas estão inversamente relacionadas com os valores da condutividade e convecção nas camadas UCZ e LCZ e somente com a condutividade do meio na camada NCZ.

Valores de referência de condutividade térmica e convecção na água são, respectivamente, 0,61 W/mK e 100 W/m<sup>2</sup>.K. Assim, espera-se que a resistência térmica na NCZ ( $R_{ncz}$ ) seja maior do que das camadas UCZ e LCZ em três ordens de grandeza.

### EQUAÇÕES DE FUNCIONAMENTO DA LAGOA

Como anteriormente proposto, um sistema de equações linearmente independente que iguale em número a quantidade de graus de liberdade do sistema estudado gera uma solução para o funcionamento da lagoa solar de gradiente salino. Da análise de equilíbrio térmico no regime permanente acima realizada, obtivemos as seguintes equações:

$$(I_{lcz} \cdot A_b) - Q_g - Q_u - Q_{cond,b-2/3} = 0$$

$$Q_g - \frac{k_{iso}}{e_{iso}} \cdot A_b \cdot (T_b - T_g) = 0$$

$$Q_{cond,b-2/3} - \frac{1}{R_{lcz}} \cdot (T_b - T_{2/3}) = 0$$

$$Q_{cond,b-2/3} + (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cond,2/3-1/3} = 0$$

$$Q_{cond,2/3-1/3} - \frac{1}{R_{ncz}} \cdot (T_{2/3} - T_{1/3}) - (I_{1/3} - I_{2/3}) \cdot A_b = 0$$

$$Q_{cv} - h_{ar} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ar}) = 0$$

$$Q_{rad} - \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{atm}^4) = 0$$

$$(I_0 - I_{1/3}) \cdot A_b + Q_{cond,2/3-1/3} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0$$

$$(I_{lcz} + (I_{1/3} - I_{2/3})) \cdot A_b - Q_g - Q_u - Q_{cond,2/3-1/3} = 0$$

$$Q_{cond,b-2/3} + (I_0 - I_{2/3}) \cdot A_b - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} - Q_{sup} = 0$$

$$-Q_u + I_0 \cdot A_b - Q_g - Q_{sup} - Q_{cv} - Q_{rad} - Q_{ev} = 0$$

As onze equações acima descrevem as trocas de calor da lagoa entre seus diferentes estratos e com o exterior, ganhos e perdas de energia. As grandezas abaixo destacadas são as incógnitas das equações enquanto as demais são condições ambientais ou de projeto, quantificáveis pelos métodos expostos a seguir. Como é possível perceber, o sistema de funcionamento da lagoa solar de gradiente salino conta com onze equações linearmente independentes e com onze diferentes incógnitas, configurando um sistema de equações não lineares determinável.

INCÓGNITA	SIGLA
Calor útil	$Q_u$
Perda de calor para o solo	$Q_g$
Perda de calor por convecção	$Q_c$
Perda de calor por radiação	$Q_{rad}$
Perdas de calor superficiais	$Q_{ov} + Q_{fw}$
Calor transmitido da LCZ para a NCZ	$Q_{cond,b-2/3}$
Calor transmitido da NCZ para a UCZ	$Q_{cond,2/3-1/3}$
Temperatura do fundo da lagoa	$T_b$
Temperatura a 2/3 da profundidade	$T_{2/3}$
Temperatura a 1/3 da profundidade	$T_{1/3}$
Temperatura na superfície da lagoa	$T_s$

**Tabela 1 - Incógnitas do sistema de equações**

**Fonte: Autoria própria.**

## PARÂMETROS AMBIENTAIS E DE MATERIAIS

As constantes indicadas nas equações acima e suas componentes, como no caso das resistências térmicas e perda de calor por evaporação estão expostas no quadro abaixo, e os métodos para a quantificação das mesmas serão detalhados na sequência.

CONSTANTE	SIGLA	MÉTODO
Temperatura do solo	$T_g$	Valores históricos – IAPAR
Temperatura do ar	$T_{ar}$	Valores históricos – IAPAR
Temperatura atmosférica	$T_{atm}$	Fórmula de Swinbank
Velocidade do ar na superfície	$V_{ar}$	Valores históricos – IAPAR
Radiação incidente na superfície	$I_0$	Radiasol2
Radiação na profundidade 1/3	$I_{1/3}$	Método de Bryant e Colbeck

Radiação na profundidade 2/3	$I_{2/3}$	Método de Bryant e Colbeck
Radiação incidente no fundo	$I_{lcz}$	Método de Bryant e Colbeck
Coeficiente de convecção do ar	$h_{ar}$	Método de Duffie e dados históricos – IAPAR
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Condutividade térmica do isolamento	$k_{iso}$	Departamento de Física Experimental – USP/Dados do fabricante
Espessura do isolamento entre LCZ e solo	$e_{iso}$	Dado de projeto
Pressão de vapor da água na superfície	$P_{v.ar}$	Instituto de Física Experimental – UFRGS
Pressão de vapor do ar sobre a lagoa	$P_{v.sup}$	Lei de Dalton, Dados históricos – IAPAR
Pressão atmosférica média	$P_{atm}$	Valores históricos – IAPAR
Condutividade térmica da água na UCZ	$k_{ucz}$	Review de correlações de Sharqway – MIT
Condutividade térmica da água na NCZ	$k_{ncz}$	Review de correlações de Sharqway – MIT
Condutividade térmica da água na LCZ	$k_{lcz}$	Review de correlações de Sharqway – MIT
Coeficiente de convecção da água na UCZ	$h_{ucz}$	Engineering Toolbox
Coeficiente de convecção da água na LCZ	$h_{lcz}$	Engineering Toolbox
Resistência térmica da LCZ	$R_{lcz}$	Cálculo
Resistência térmica da NCZ	$R_{ncz}$	Cálculo
Área da superfície da lagoa	$A_s$	Dado de projeto
Área do fundo da lagoa	$A_b$	Dado de projeto
Espessura da camada UCZ	$e_{ucz}$	Dado de projeto

Espessura da camada NCZ	$e_{ncz}$	Dado de projeto
Espessura da camada LCZ	$e_{lcz}$	Dado de projeto

**Tabela 2 - Constantes do sistema de equações**

Fonte: Autoria própria.

Algumas constantes necessárias para a solução do sistema acima descrito podem ser obtidas através de registros históricos, como as temperaturas do solo, ar e atmosfera, a pressão atmosférica e velocidade do vento, todos dados disponíveis na base de dados do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Valores referentes à geometria da lagoa e especificação de materiais empregados, como a espessura do isolamento entre a lagoa e solo, são considerados como dados de projeto.

Os valores da radiação solar na superfície e nas profundidades desejadas são determinados com o auxílio do software RadiaSol2 pelo método proposto por Bryant e Colbeck (Kanan, 2014):

Irradiação média (kWh/m <sup>2</sup> /dia)				
Mês	Global	Direta	Difusa	Inclinada
1	5,4	1,95	2,59	4,65
2	5,11	4,38	2,39	4,72
3	4,4	6,16	2,37	4,67
4	3,79	8,51	2,27	4,48
5	3,11	10,42	1,83	4,08
6	2,86	12,98	1,74	4
7	3,08	14,95	1,76	4,21
8	3,68	17,54	1,88	4,55
9	3,87	19,98	2,36	4,29
10	4,65	21,33	2,51	4,6
11	5,3	23,91	2,76	4,74
12	5,43	24,87	2,83	4,67
Média diária anual	4,22	13,92	2,27	<b>4,47</b>

**Tabela 3 - Software RadiaSol 2, irradiação média**

Fonte: Laboratório de energia solar da UFRGS.

O software Radiasol2 fornece a tabela acima de onde se define o valor de  $I_0$  médio anual para a região de Curitiba:  $I_0 = 4.47 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ .

Para encontrar a parcela desse valor que atinge a profundidade do limite inferior de cada uma das 3 camadas da lagoa, lança-se mão da equação de Bryant e Colbeck:

$$\frac{I_x}{I_0} = \left\{ 0,36 - 0,08 \cdot \ln\left(\frac{x}{\cos \theta_r}\right) \right\}$$

O ângulo de refração pode ser calculado pela equação de Snell (Kanan, 2014)

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = 1,333$$

Onde,

$\theta_i$  – Ângulo de incidência na superfície da lagoa, equivalente ao ângulo azimutal do capítulo 4.13.9;

$\theta_r$  – Ângulo de refração na superfície da lagoa;

Do software Radiasol2, sabe-se que o ângulo azimutal em Curitiba durante o equinócio, considerado como o ângulo médio mensal, é  $108,73^\circ$ . Através da lei de Snell temos o ângulo de refração da lagoa  $45,04^\circ$ . Retornando esses valores à equação (13), tem-se:

Radiação na Lagoa Solar	
Profundidade	$I(x) - \text{kWh/m}^2/\text{dia}$
1m	1,485009
2m	1,237139
3m	1,092145

**Tabela 4 – Radiação em diferentes profundidades da lagoa solar**

**Fonte: Autoria própria.**

O coeficiente de convecção do ar ( $h_{ar}$ ), utilizado na equação 21, pode ser determinado pela fórmula de proposta por Duffie, amplamente aceita e empregada em trabalhos que lidam com a convecção de maneira semelhante (Duffie, 1974):

$$h_{ar} = 5,7 + 3,8 \cdot V_{ar}$$

Onde,

$h_{ar}$  – Coeficiente de convecção do ar ( $W/m^2.K$ )

$V_{ar}$  – Velocidade do vento sobre a superfície da lagoa ( $m^2$ )

A tabela a seguir apresenta médias mensais e anuais da velocidade do vento na região de Curitiba/PR.

VENTO		
Mês	Direção	Velocidade (m/s)
Jan	NE	3,3
Fev	NE	3,0
Mar	NE	2,9
Abr	NE	3,2
Mai	NE	3,1
Jun	NE	3,2
Jul	NE	3,6
Ago	NE	3,7
Set	NE	4
Out	NE	3,9
Nov	NE	3,9
Dez	NE	3,6
Média anual		<b>3,45</b>

**Tabela 5 – Velocidade do ar em Curitiba.**

**Fonte: IAPAR, 2001.**

Retornando à equação (47), encontra-se o valor de  $h_{ar}$ :

$$h_{ar} = 5.7 + 3.8.3.45 = 18.81 W/m^2.K$$

Enquanto os valores de perda de calor pela adição de água fresca ou “overflow” serão considerados como desprezíveis, a evaporação perda de calor consequente são quantificadas pela fórmula de Bowen já previamente exposta (Bowen, 1926).

$$Q_{ev} = \frac{Q_{cv}}{R}$$

Onde:

$Q_{ev}$  – Calor perdido devido à evaporação da camada superficial da lagoa;

$Q$  – Calor perdido por convecção entre a superfície da lagoa e o ar;

$R$  – Razão de Bowen;

A razão de Bowen é definida pela seguinte fórmula (Bowen, 1926):

$$R = 0,46. \left( \frac{T_s - T_{ar}}{P_{v,sup} - P_{v,ar}} \right) \cdot \frac{P}{760}$$

Onde:

- $T_s$  – Temperatura da superfície do corpo d'água;
- $T_{ar}$  – Temperatura do ar que circula sobre o corpo d'água;
- $P_{v,sup}$  – Pressão de vapor da superfície do corpo d'água;
- $P_{v,ar}$  – Pressão de vapor do ar que circula sobre o corpo d'água;
- $P$  – Pressão atmosférica (mm/Hg);

A pressão de vapor na superfície do corpo d'água pode ser determinada através dos ábacos disponibilizados pelo Centro de Referência para o Ensino de Física da UFRGS (REF-UFRGS). A pressão de vapor do ar sobre a lagoa pode ser definida pela Lei de Dalton das Pressões Parciais (Dutton, 1961):

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = f_i$$

Onde;

- $P_i$  – Pressão parcial do gás estudado (atm);
- $P$  – Pressão total da mistura de gases (atm);
- $n_i$  – Número de moles do gás estudado;
- $n$  – Número de moles da mistura de gases;
- $f_i$  – Fração molar, proporção entre a quantidade de moles do gás estudado e a mistura total (ppm ou %);

Novamente, os valores médios de pressão atmosférica variam conforme o local de instalação do projeto de uma lagoa solar e são facilmente obtidos em institutos como o Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR).

Desta maneira, pode se definir  $P_i$  como  $P_{v,ar}$ ,  $P$  como a pressão atmosférica normal e  $f_i$  como a umidade relativa do ar. Através dessas substituições temos:

$$P_{v,ar} = P_{atm} \cdot f_{h2o} = P_{atm} \cdot U_{\%}$$

Onde;

- $P_{v,ar}$  - Pressão de vapor do ar sobre a lagoa (atm);
- $P_{atm}$  – Pressão atmosférica (atm);
- $f_{h2o}$  – Fração molar de água no ar atmosférico (ppm ou %);
- $U_{\%}$  - Umidade relativa do ar (%);

É importante ressaltar que temperatura da superfície, incógnita da equação de Bowen é também uma das incógnitas do sistema de equações do

funcionamento e, portanto, desconhecida. Nesta etapa a temperatura da superfície será estimada como 0,5°C acima da temperatura do ar, a fim de evitar o cálculo iterativo.

Das tabelas abaixo encontra-se as médias anuais de umidade e pressão atmosférica.

Umidade	
Mês	Valor (%)
Jan	21,4
Fev	21,4
Mar	20,3
Abr	18
Mai	15,1
Jun	13,9
Jul	13,8
Ago	15,2
Set	16,4
Out	18
Nov	19,5
Dez	20,8
Média anual	17,82

**Tabela 6 – Umidade do ar em Curitiba.**

**Fonte: IAPAR, 2001.**

Pressão atmosférica	
Mês	Valor (atm)
Jan	0,8992
Fev	0,9008
Mar	0,9006
Abr	0,9022
Mai	0,9028
Jun	0,9040
Jul	0,9045
Ago	0,9038
Set	0,9028
Out	0,9011
Nov	0,9002
Dez	0,8991
Média anual	0,90

**Tabela 7 – Pressão atmosférica em Curitiba.**

**Fonte: IAPAR, 2001.**

Dos valores encontrados nas tabelas 6 e 7 aplicados na equação (50), encontram-se os seguintes valores:

$$P_{v,ar} = 0,16 \text{ atm}$$

$$P_{atm} = 0,90 \text{ atm ou } 684,11 \text{ mm/hg}$$

A página do Centro de Referência para o Ensino de Física da UFRGS (REF-UFRGS), encontra-se o seguinte valor:

$$P_{v,\text{sup}} = 0,028 \text{ atm}$$

Aplicando esses valores na equação (19), tem-se:

$$R = 0,46 \cdot \left( \frac{24,6 - 24,1}{0,1602 - 0,028} \right) \cdot \frac{684,11}{760} = 1,5666$$

Assim, determina-se  $Q_{\text{ev}}$  como  $Q_{\text{cv}}/R$  ou 63,83% de  $Q_{\text{cv}}$ .

O LDPE, material utilizado como isolamento na lagoa solar de Kutch, foi considerado como valor de referência neste modelo teórico. Da página “The Engineering Toolbox” encontra-se o valor:

$$K_{\text{iso}} = 0,33 \text{ W/m.K}$$

Da mesma página encontra-se os valores das seguintes constantes:

$$h_{\text{lcz}} = h_{\text{ucz}} = 100 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

De (SHARQAWY, 2010) percebe-se que a variação da condutividade térmica da água com a salinidade é quase desprezível:

$$k_{\text{ucz}} = 0,61 \text{ W/m.K}$$

$$k_{\text{ncz}} = 0,61 \text{ W/m.K}$$

$$k_{\text{lcz}} = 0,60 \text{ W/m.K}$$

A temperatura da atmosfera se relaciona com a temperatura ambiente através da fórmula de Swinbank (ALENEZI, 2012):

$$T_{\text{atm}} = 0,0552 \cdot T_{\text{ar}}^{1,5}$$

Da equação (51) encontramos:

$$T_{\text{atm}} = 6,530774 \text{ K}$$

$$(T_s^4 - T_{\text{atm}}^4) = 364.399,5 \text{ K}^4$$

$$\sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{atm}}^4) = 0,020661 \text{ W/m}^2$$

Conhecidas as espessuras e coeficientes condução e convecção da água na lagoa é possível calcular as resistências térmicas das camadas UCZ, NCZ e LCZ nas equações (26), (27) e (28):

$$R_{lcz} - 9,9403 \times 10^{-6} \text{ K/W}$$

$$R_{ncz} - 1,6393 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_{ucz} - 9,9393 \times 10^{-6} \text{ K/W}$$

Percebe-se que a resistência térmica da NCZ é maior do que a das outras camadas em três ordens de grandeza, condizente com a função isolante da região na lagoa e com o esperado no estudo das resistências térmicas.

Aplicando os valores acima na tabela 2:

CONSTANTE	SIGLA	Valor
Temperatura do solo	$T_g$	19,1°C
Temperatura do ar	$T_{ar}$	24,1°C
Temperatura atmosférica	$T_{atm}$	6,53°C
Velocidade do ar na superfície	$V_{ar}$	3,45 m/s
Radiação incidente na superfície	$I_0$	4,47 kWh/m <sup>2</sup> .dia
Radiação na profundidade 1/3	$I_{1/3}$	1,4850 kWh/m <sup>2</sup> .dia
Radiação na profundidade 2/3	$I_{2/3}$	1,2371 kWh/m <sup>2</sup> .dia
Radiação incidente no fundo	$I_{lcz}$	1,0921 kWh/m <sup>2</sup> .dia
Coeficiente de convecção do ar	$h_{ar}$	18,81 W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	5,67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
Condutividade térmica do isolamento	$k_{iso}$	0,33 W/m.K
Espessura do isolamento entre LCZ e solo	$e_{iso}$	0,00025 m
Pressão de vapor da água na superfície	$P_{v.ar}$	0,028 atm
Pressão de vapor do ar sobre a lagoa	$P_{v.sup}$	0,16 atm
Pressão atmosférica média	$P_{atm}$	0,9 atm
Condutividade térmica da água na UCZ	$k_{ucz}$	0,61 W/m.K

Condutividade térmica da água na NCZ	$k_{ncz}$	0,61 W/m.K
Condutividade térmica da água na LCZ	$k_{lcz}$	0,60 W/m.K
Coeficiente de convecção da água na UCZ	$h_{ucz}$	100 W/m <sup>2</sup> .K
Coeficiente de convecção da água na LCZ	$h_{lcz}$	100 W/m <sup>2</sup> .K
Resistência térmica da LCZ	$R_{lcz}$	$9,9403 \times 10^{-6}$ K/W
Resistência térmica da NCZ	$R_{ncz}$	$1,6393 \times 10^{-3}$ K/W
Área da superfície da lagoa	$A_s$	1.000 m <sup>2</sup>
Área do fundo da lagoa	$A_b$	1.000 m <sup>2</sup>
Espessura da camada UCZ	$e_{ucz}$	1 m
Espessura da camada NCZ	$e_{ncz}$	1 m
Espessura da camada LCZ	$e_{lcz}$	1 m

**Tabela 8 - Constantes do sistema de equações**  
**Fonte: Autoria própria.**