

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 11 / 12 / 00
Ass.: *Acem*

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO: A ESTRATIFICAÇÃO E SEUS EFEITOS

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017071

Erich Kellner



Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil: Área de Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Assoc. Eduardo Cleto Pires

São Carlos
2000

Class.	TESE-EESC
Cut.	#2939
Tombo	037/01

311000170#1

st 1127721

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

K29m

Kellner, Erich

Modelação matemática do comportamento térmico de lagoas de estabilização : a estratificação e seus efeitos / Erich Kellner. -- São Carlos, 2000.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Assoc. Eduardo Cleto Pires.

1. Lagoas de estabilização. 2. Estratificação térmica. 3. Insolação. 4. Modelo matemático. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ERICH KELLNER**

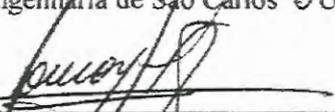
Tese defendida e aprovada em 24-11-2000
pela Comissão Julgadora:



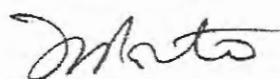
Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



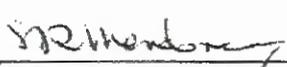
Prof. Titular **JOSE ROBERTO CAMPOS**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MILTON TOMOYUKI TSUTIYA**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



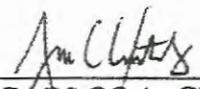
Profa. Doutora **MÔNICA FERREIRA DO AMARAL PORTO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Msc. **SÉRGIO ROLIM MENDONÇA**
(Especialista - Consultor da Organização Panamericana de Saúde)



Prof. Associado **EDUARDO CLETO PIRES**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e professor Eduardo Cleto Pires pela orientação, apoio e incentivo dados para a realização deste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudo concedida;

À Eleninha, bibliotecária da EESC/USP, pelo auxílio na realização da pesquisa bibliográfica;

Ao Dr. Irineu Bianchini Jr., professor do Centro de Ciências Biológicas da UFSCar, pelas sugestões referentes a elaboração dos critérios para determinação do volume útil;

Ao Dr. Heinz G. Stefan, professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Minnesota (EUA) e, ao Dr. Ruochuan Gu, professor do Departamento de Construção e Engenharia Civil da Universidade do Estado do Iowa (EUA), pelas informações concedidas no início deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Roberto Campos, pelos conselhos dados durante a realização de todo o trabalho;

Aos amigos Werner, Andréa, Marilu e André pela amizade e companheirismo;

A todos os funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento, em especial à Pavi e à Sá, pelo apoio dado;

Aos meus pais Wilkes e Maria Terezinha e, aos meus irmãos Hermann e Ingrid, pelo carinho, apoio e incentivo;

À minha esposa Soraya, pelo carinho, amor, amizade e compreensão...

...e por lembrar-me que existe vida além do computador!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS	3
3 - O FENÔMENO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA	4
3.1 - Os efeitos da radiação solar para o ambiente aquático	9
3.2 - A influência da estratificação térmica sobre a qualidade do efluente	12
3.3 - A influência dos aspectos climáticos no balanço de energia térmica das lagoas	13
3.3.1 - Radiação solar de ondas curtas: I_s e I_{sr}	14
3.3.2 - Radiação atmosférica líquida de ondas longas: H_a e H_{ar}	19

3.3.3 - Radiação de ondas longas emitida pela água: H_w	20
3.3.4 - Perda da energia térmica por evaporação: H_e	20
3.3.5 - Transferência de calor por condução/convecção: H_c	21
3.4 - Avaliação da eficácia do modelo matemático na previsão da radiação solar de ondas curtas (I_o) e na radiação líquida (H_{net}).....	22
3.5 - Comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização e sua influência na estratificação térmica.....	29
3.5.1 - Fontes de energia para mistura.....	31
3.5.1.1 - Trocas de energia térmica.....	31
3.5.1.2 - Ação do vento.....	31
3.5.1.3 - Vazão de entrada.....	32
3.5.1.4 - Vazão de saída.....	32
3.5.1.5 - Equipamentos mecânicos.....	32
3.5.2 - Processos de transporte de energia e massa.....	33
3.6 - Indicadores da estratificação térmica.....	35
3.6.1 - Critério proposto pela Water Resources Engineers, Inc.	35
3.6.2 - Critério proposto por WATANABE.....	37
3.6.3 - Critério proposto por DAVIDSON et al. (1994).	38
4 - MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA E DO VOLUME ÚTIL.....	40
4.1 - Formulação para cálculo do perfil de temperatura.....	44
4.1.1 - Balanço de massa.....	44
4.1.2 - Balanço da energia térmica.....	46
4.1.3 - Energia térmica armazenada por um elemento de controle.....	47
4.1.4 - Cálculo do Perfil de Temperatura.....	48
4.1.4.1 - Método de Heun.....	50
4.1.4.2 - Método de Runge-Kutta de 4ª ordem.....	53
4.1.5 - Procedimento de Cálculo do <i>Perfil Zero</i>	54
4.2 - Formulação para cálculo do volume útil.....	57
4.2.1 - Critério do Gradiente de Densidade.....	59
4.2.2 - Critério do Gradiente de Temperatura.....	61
4.2.3 - Critério da Diferença de Temperatura.....	63
4.3 - Avaliação dos Resultados Obtidos na Simulação Numérica.....	64
4.3.1 - Avaliação dos Resultados para Região de Campina Grande (PB).....	65

4.3.2 – Avaliação dos Resultados para Região de Santa Fé do Sul (SP)	71
4.3.3 – Simulações e Estudos de Casos	77
4.3.4 – Avaliação dos Indicadores de Estratificação Térmica.....	87
4.3.5 – Avaliação do Tempo de Processamento.....	91
4.3.6 – Análise de Sensibilidade do Modelo Térmico	93
5 - A INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NO TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICO	98
5.1 - Técnica de Estímulo e Resposta.....	105
5.2 – Estimativa do Tempo de Detenção Hidráulico Médio da Lagoa.....	108
5.3 – Avaliação dos Resultados Obtidos na Simulação Numérica.....	110
5.3.1 – Avaliação dos Resultados para Região de Campina Grande (PB).....	110
5.3.2 – Avaliação dos Resultados para Região de Santa Fé do Sul (SP).....	114
6 – DISCUSSÃO.....	117
6.1 – Radiação Térmica	117
6.2 – Cálculo do Perfil de Temperatura.....	120
6.3 – Indicadores de Estratificação Térmica	122
6.4 – Determinação do Volume Útil.....	123
6.5 – Programa Computacional.....	124
7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	130
7.1 – Conclusões.....	130
7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
APÊNDICE I.....	i

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Variação da massa específica da água em função da temperatura	5
FIGURA 3.2: Perfil vertical de temperatura da lagoa facultativa da cidade de Ramle (Jerusalém)	8
FIGURA 3.3: Troca da energia térmica sobre a superfície da lagoa devido às condições climáticas.	14
FIGURA 3.4: Esfera Celeste.....	16
FIGURA 3.5: Analena.....	17
FIGURA 3.6: Variação da radiação solar de ondas curtas (I_o) ao longo do ano de 1995.	23
FIGURA 3.7: Radiação média de ondas curtas e a variação da distância adimensional entre a Terra e o Sol.....	24
FIGURA 3.8: Função Correção (ξ).....	25
FIGURA 3.9: Comparação entre a radiação média de ondas curtas medida, calculada pela eq.(3.13) e pela eq.(3.23)	26
FIGURA 3.10: Balanço de energia térmica a partir dos dados obtidos pelo CRHEA na represa do Broa.	27
FIGURA 3.11: Relação entre a radiação atmosférica líquida de ondas longas (H_{an}) e a radiação de ondas longas emitida pela água (H_w) - Represa do Broa/1995.....	27
FIGURA 3.12: Correlação entre a temperatura do ar (T_{ar}) e temperatura da superfície da água (T_w) - Represa do Broa/1995	28
FIGURA 3.13: Variação entre os centros de massa de um volume d'água estratificado e um volume desestratificado	30
FIGURA 4.1: Escoamento afluente em uma lagoa de estabilização	40
FIGURA 4.2: Representação conceitual da lagoa estratificada	43
FIGURA 4.3: Transferência de calor e massa em um elemento do volume de controle ...	44
FIGURA 4.4: Resultados obtidos para o <i>Perfil Zero</i> em função do erro relativo máximo (ϵ) para a simulação de Campina Grande (PB).....	56

FIGURA 4.5: Resultados obtidos para o <i>Perfil Zero</i> em função do erro relativo máximo (ε) para a simulação de Santa Fé do Sul (SP)	56
FIGURA 4.6: Comparação entre os perfis de temperatura de 1/jan com o perfil de 31/dez para a simulação de Campina Grande (PB).....	57
FIGURA 4.7: Comparação entre os perfis de temperatura de 1/jan com o perfil de 31/dez para a simulação de Santa Fé do Sul (SP).....	57
FIGURA 4.8: Comparação da diferença da densidade da água para dois intervalos de temperatura distintos.....	60
FIGURA 4.9: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério do gradiente de densidade.....	61
FIGURA 4.10: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério do gradiente de temperatura.....	62
FIGURA 4.11: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério da diferença de temperatura.....	64
FIGURA 4.12: Perfis de temperatura calculados e obtidos <i>in loco</i> em uma lagoa facultativa em Campina Grande (PB).....	66
FIGURA 4.13: Distribuição da diferença relativa percentual entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as temperaturas simuladas para a lagoa facultativa de Campina Grande (PB)	67
FIGURA 4.14: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério do gradiente de densidade da água.....	68
FIGURA 4.15: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério do gradiente de temperatura.....	69
FIGURA 4.16: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério da diferença de temperatura.....	70
FIGURA 4.17: Perfis de temperatura calculados e obtidos <i>in loco</i> em uma lagoa facultativa em Santa Fé do Sul (SP)	72
FIGURA 4.18: Distribuição da diferença relativa percentual entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as temperaturas simuladas para a lagoa facultativa de Santa Fé do Sul (SP).....	73
FIGURA 4.19: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério do gradiente de densidade da água.....	74
FIGURA 4.20: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério do gradiente de temperatura.....	75
FIGURA 4.21: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério da diferença de temperatura.....	76
FIGURA 4.22: Variação da média diária do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) relocada em Campina Grande (PB).....	78
FIGURA 4.23: Variação da média diária do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB) relocada em Santa Fé do Sul (SP).....	79

FIGURA 4.24: Variação do gradiente térmico da lagoa de Campina Grande (PB) ao longo do ano.....	80
FIGURA 4.25: Variação do gradiente térmico da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) ao longo do ano.....	82
FIGURA 4.26: Variação da relação $W_{AMBIENTE}/W_{AFLUENTE}$ para a lagoa de Campina Grande (PB).....	83
FIGURA 4.27: Variação da relação $W_{AMBIENTE}/W_{AFLUENTE}$ para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP).....	84
FIGURA 4.28: Formação dos perfis de temperatura na lagoa de Campina Grande(PB), em função do posicionamento do dispositivo de saída.....	85
FIGURA 4.29: Variação da temperatura média diária da lagoa de Campina Grande (PB) em função da profundidade do dispositivo de saída.....	86
FIGURA 4.30: Variação horária do número MIX, do número de Froude Densimétrico e do número <i>Pond</i> para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP) no dia 5 de março.....	88
FIGURA 4.31: Variação horária do número MIX, do número de Froude Densimétrico e do número <i>Pond</i> para a lagoa de Campina Grande (PB) no dia 6 de julho.....	90
FIGURA 4.32: Variação do Tempo de Processamento em relação ao computador utilizado.....	92
FIGURA 5.1: Desenho esquemático do vento induzindo a mistura em um reservatório ...	99
FIGURA 5.2: Representação das zonas morta, advectiva e de mistura.....	101
FIGURA 5.3: Formação de zonas morta, de mistura e advectiva a partir do volume útil da lagoa.....	102
FIGURA 5.4: Dispersão longitudinal.....	103
FIGURA 5.5: Curvas com mesmo número de dispersão mas diferentes tempos médios de residência.....	104
FIGURA 5.6: Curvas com mesmo tempo médio de residência mas diferentes números de dispersão.....	104
FIGURA 5.7: Representação gráfica de uma curva DTR indicando alguns parâmetros básicos para sua análise.....	105
FIGURA 5.8: Tipos de escoamento que podem ocorrer em reatores que se aproximam do escoamento tubular.....	107
FIGURA 5.9: Tipos de escoamento que podem ocorrer em reatores que se aproximam da mistura completa.....	107
FIGURA 5.10: Formação de correntes verticais advectivas.....	108
FIGURA 5.11: Desenho esquemático do fluxo advectivo.....	109
FIGURA 5.12: Comparação entre os tempos de residência adimensionais obtido experimentalmente e pelos critérios para determinação do volume útil para a lagoa de Campina Grande (PB).....	111

FIGURA 5.13: Erro relativo entre o valor dos tempos de detenção hidráulico adimensionais obtido por SILVA (1982) e aqueles obtidos pela simulação numérica, em função do critério utilizado para determinação do volume útil.....	112
FIGURA 5.14: Erro Relativo Absoluto entre os tempos de detenção hidráulico adimensionais obtidos por SILVA (1982) e por simulações numéricas aplicando o critério do Gradiente de Temperatura.....	113
FIGURA 5.15: Erro Relativo Absoluto entre os tempos de detenção hidráulico adimensionais obtidos por SILVA (1982) e por simulações numéricas aplicando o critério da Diferença de Temperatura.....	114
FIGURA 5.16: Tempos de residência adimensionais obtidos a partir da simulação numérica feita para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP), em função dos critérios para determinação do volume útil.....	115
FIGURA 6.1: Correlações entre H_{net} e $(H_{a_n} - H_w)$, H_c e $(I_o - H_e)$ para a represa do Broa - 1995.....	119
FIGURA 6.2: Variação dos perfis de temperatura em função do passo adotado, Empregando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem.....	121
FIGURA 6.3: Variação dos perfis de temperatura em função do passo adotado, Empregando o método de Heun.....	121
FIGURA 6.4: Tela para entrada das coordenadas geográficas e da altitude do local de implantação da lagoa de estabilização.....	125
FIGURA 6.5: Tela para entrada dos Dados Climáticos.....	126
FIGURA 6.6: Tela para entrada dos dados referentes às características quantitativas do afluente.....	126
FIGURA 6.7: Tela para entrada das dimensões da lagoa.....	127
FIGURA 6.8: Tela para especificação das propriedades do líquido da lagoa e dos parâmetros de cálculo.....	127
FIGURA 6.9: Tela gráfica de saída dos dados referente às variações da energia térmica disponível, número de Froude e volume útil da lagoa.....	128
FIGURA 6.10: Tela para saída gráfica do perfil vertical de temperatura para um determinado dia e hora.....	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Comparação da densidade da água em diferentes intervalos de temperatura.....	6
TABELA 3.2: Comprimentos de onda da radiação fotossinteticamente ativa (RFA).....	10
TABELA 3.3: Valores das constantes A e B em função da condição do céu.....	18
TABELA 4.1 : Análise de Sensibilidade do Modelo de Estratificação Térmica	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

adim.	- adimensional
cal	- caloria
CEPIS	- Centro Paramericano de Ingenieria Sanitaria y Ciências del Ambiente
CNPq	- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CRHEA	- Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
dec.	- decimal
DTR	- distribuição do tempo de residência
EDO	- equação diferencial ordinária
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
IAG	- Instituto Astronômico e Geofísico
J	- joule
OPS	- Organização Panamericana de Saúde
PVI	- problema de valor inicial
rad.	- radianos
RFA	- radiação fotossinteticamente ativa
s	- segundo
SI	- Sistema Internacional de Unidades
UFSCar	- Universidade Federal de São Carlos
USP	- Universidade de São Paulo
W	- Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B	- constantes em função de C (adim.)
A_t	- coeficiente de transmissão atmosférica (adim.)
A_z	- área horizontal da lagoa para uma determinada profundidade (m^2)
C	- fração de cobertura do céu por nuvens (adim.)
C_e	- concentração de um determinado elemento ($kg.m^{-3}$)
c_{pi}	- calor específico da água ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D	- coeficiente de difusão ($m^2.s^{-1}$)
D_t	- dia do ano
D_v	- razão de diluição para a vazão de entrada (adim.)
d	- número de dispersão (adim.)
EP	- energia potencial do volume líquido ($kg.m^2.s^{-2}$)
E_z	- coeficiente de difusão vertical ($m^2.s^{-1}$)
d_{SD}	- profundidade do disco de Secchi (m)
e_a	- pressão parcial de vapor a 2,0m acima da superfície da água (mmHg)
e_s	- pressão parcial de vapor à temperatura da superfície da água (mmHg)
F_D	- número de Froude (adim.)
f_i	- fator de atrito interfacial (adim.)
G	- gradiente térmico ($^{\circ}C.m^{-1}$)
g	- aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$)
H	- profundidade da lagoa (m)
H_a	- radiação atmosférica de ondas longas incidentes ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$)
H_{ar}	- radiação atmosférica de ondas longas refletidas ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$)
H_{an}	- radiação atmosférica líquida de ondas longas ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$)
H_c	- transferência de energia térmica devido a condução e a convecção ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$)

H_e	- perda de energia térmica por evaporação ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
H_j	- energia térmica contida no elemento j ($\text{J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
H_L	- hora local (hora)
H_{net}	- energia térmica líquida que entra ou sai da lagoa ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
H_W	- radiação de ondas longas emitidas pela superfície da água ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
h	- passo - intervalo de tempo entre duas iterações numéricas (s)
ha	- angulo horário (rad.)
h_d	- energia térmica transmitida pela difusão (J.s^{-1})
h_i	- energia térmica introduzida pela vazão afluyente (J.s^{-1})
h_o	- energia térmica retirada pela vazão efluente (J.s^{-1})
h_{sz}	- energia térmica introduzida pela insolação direta (J.s^{-1})
h_o	- altura do epilimnio (m)
$h_{útil}$	- altura útil (m)
h_w	- energia térmica advectada ao longo do eixo vertical (J.s^{-1})
I	- radiação térmica em uma determinada profundidade ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
I_S	- radiação solar de ondas curtas que chega à superfície da água ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
I_S^*	- radiação solar de ondas curtas corrigida ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
I_{SC}	- constante solar ($2880 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
I_o	- radiação térmica líquida que atravessa a superfície da água ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
j	- número do elemento
K_P	- constante do processador (adim.)
k	- coeficiente de extinção da luz solar (m^{-1})
L	- comprimento da lagoa (m)
M_{STR}	- momento de energia para condição de entratificação térmica (W.m)
M_{MLX}	- momento de energia para condição de mistura completa (W.m)
M_{Real}	- momento de energia para condição existente (W.m)
MIX	- número MIX (adim.)
m	- massa ótica de ar (adim.)
NPV	- número de pontos na vertical
P	- número Pond (adim.)
Q	- vazão ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$)
Q_i	- vazão afluyente ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Q_o	- vazão efluente ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
Q_z	- vazão vertical ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
q_x	- fluxo de massa transportada no direção x ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

R^2	- coeficiente de correlação linear (adim.)
Re	- número de Reynolds
R_h	- umidade relativa do ar (dec.)
r	- raio adimensionalizado da órbita terrestre (adim.)
T_a	- temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_{in}	- temperatura afluyente ($^{\circ}\text{C}$)
T_j^t	- temperatura do elemento j no tempo t ($^{\circ}\text{C}$)
TP	- tempo de processamento (s)
T_s	- temperatura da superfície da água ($^{\circ}\text{C}$)
t_g	- tempo referente a passagem do centro de massa (s)
t_i	- tempo solar verdadeiro (hora)
t	- tempo (s)
U	- velocidade média de escoamento (m.s^{-1})
UA	- coeficiente global de transferência de calor (W.K^{-1})
V	- volume da lagoa (m^3)
V_{TOTAL}	- volume total da lagoa (m^3)
V_{UTIL}	- volume útil (m^3)
V_v	- velocidade do vento (Km.h^{-1})
\bar{V}_j	- volume do j-ésimo elemento (m^3)
W	- largura da lagoa (m)
$W_{afluente}$	- potência térmica fornecida pelo afluyente (J.s^{-1})
$W_{ambiente}$	- potência térmica fornecida pelo ambiente (J.s^{-1})
Z	- altitude do local em relação ao nível do mar (m)
ΔT_o	- diferença de temperatura entre a vazão afluyente e a temperatura média da lagoa ($^{\circ}\text{C}$)
Δt	- intervalo de tempo (s)
$\Delta\rho$	- diferença de densidade entre a camada líquida do fundo e a camada superficial da lagoa (kg.m^3)
Δz	- espessura do elemento de controle (m)
α	- altitude solar (graus)
β	- coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
δ	- declinação do Sol (rad.)
γ	- taxa de radiação solar absorvida pela superfície líquida (adim.)
ε	- erro relativo máximo (dec.)

ε_a	- emissividade média da atmosfera (adim.)
ρ	- densidade da água (kg.m^{-3})
ρ_o	- densidade de referência (kg.m^{-3})
ρ_T	- densidade da água para uma determinada temperatura T (kg.m^{-3})
σ	- constante de Stefan-Boltzman ($\cong 2,11 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{°C}^{-4}.\text{dia}^{-1}$)
σ^2	- variância do tempo de residência (dia^2)
$\bar{\theta}$	- tempo médio de detenção hidráulico (dia)
θ	- tempo de residência médio adimensional (adim.)
ϕ	- latitude do local de implantação (graus)
ψ	- longitude do local de implantação (graus)
ξ	- equação do tempo (minuto)
ζ	- fator corretivo do raio adimensional da órbita terrestre (adim.)

RESUMO

KELLNER, E. (2000). *Modelação matemática do comportamento térmico de lagoas de estabilização: a estratificação e seus efeitos*. São Carlos, 2000. 139p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A estratificação térmica, caracterizada por um elevado gradiente térmico ao longo da profundidade, normalmente é observada em lagoas profundas. No entanto, embora as lagoas de estabilização apresentem pequena profundidade, a alta turbidez dessas unidades de tratamento proporcionam condições favoráveis a ocorrência desse fenômeno, principalmente durante o verão. Durante essa época do ano, as camadas mais próximas à superfície concentram uma maior quantidade de energia térmica em relação as camadas mais profundas, gerando então, um diferencial de temperatura entre a superfície e o fundo das lagoas. O aquecimento diferenciado das camadas de água gera um perfil de densidade, estando as camadas menos densas localizadas junto à superfície da lagoa e, as mais densas, junto ao fundo. Essa diferença de densidade na coluna líquida provoca alteração no padrão de escoamento e a diminuição do volume útil da lagoa. Esta tese apresenta modelo matemático desenvolvido para previsão das condições de estratificação térmica em lagoas de estabilização, permitindo estimar o volume efetivamente utilizado para o tratamento das águas residuárias, assim como corrigir o tempo médio de residência do líquido na lagoa. Os resultados teóricos foram comparados com observações experimentais obtendo-se diferenças máximas de 15% entre os perfis de temperatura calculados e observados.

Palavras-chave: lagoas de estabilização; estratificação térmica; insolação; modelo matemático.

A BSTRACT

KELLNER, E. (2000). *Mathematical modelling of the thermal behavior of stabilization ponds: the stratification and its effects*. São Carlos, 2000. 139p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Thermal stratification, which is characterized by a high thermal gradient along the depth, is usually observed in deep lakes. However, although stabilization ponds present small depths, the high turbidity of those units of treatment provides favorable conditions for the occurrence of that phenomenon, mainly during the summer. During that time of the year, the layers nearest to the surface concentrate a larger amount of thermal energy compared to the deepest layers, which results in a temperature difference between the surface and the bottom of the pond. As a consequence a density profile appears, with the less dense layers located at the surface of the pond and the densest ones close to the bottom. This stratification in the liquid column induces alterations in the flow pattern and a decrease of the useful volume of the pond. This thesis presents a mathematical model developed to forecast the conditions of thermal stratification in stabilization ponds and the volume really used for the treatment of the wastewater's. With these values it is possible to correct the average residence time of the liquid in the pond. The theoretical results were compared with experimental observations with maximum differences of 15% between the calculated and observed temperature profiles.

Keywords: stabilization ponds; thermal stratification; insolation; mathematical model.

1 *INTRODUÇÃO*

As lagoas de estabilização vem sendo empregadas com sucesso no tratamento de esgotos sanitários, principalmente aqueles com características semelhantes a da maioria dos municípios de pequeno e médio porte.

Um dos principais motivos para a adoção desse sistema de tratamento está relacionado à simplicidade construtiva e operacional que lhe é inerente. Por outro lado, as lagoas de estabilização requerem grandes áreas para sua implantação, se comparados a outros sistemas de tratamento de esgotos, fato este que pode tornar proibitivo o seu emprego.

O tratamento biológico que se processa nas lagoas de estabilização, em especial nas lagoas facultativas e de maturação, está baseado no fenômeno de autodepuração dos esgotos, observados nos corpos d'água naturais.

O dimensionamento das lagoas de estabilização está baseado em métodos que consideram a temperatura, a taxa de aplicação superficial de carga orgânica, na remoção do substrato ou nos fatores de dispersão, estando todos eles, direta ou indiretamente relacionados ao tempo de detenção hidráulico.

Ainda que existam vários modelos empíricos, semi-empíricos e mecânicos baseados nos métodos anteriormente citados, como foi levantado em trabalho anterior (ver KELLNER, 1996), nenhum deles considera o efeito da estratificação térmica em seus resultados.

Embora o fenômeno da estratificação térmica geralmente esteja associado aos corpos d'água com grandes profundidades, tem sido objeto de pesquisas recentes sua influência no comportamento hidráulico das lagoas de estabilização, bem como na qualidade de seus efluentes.

As principais evidências relatadas na literatura, referentes à influência da estratificação térmica nas lagoas de estabilização, mencionam a ocorrência de curtos-circuitos e a diminuição do seu volume útil (ou aquele efetivamente percorrido pela vazão afluyente).

Da interação entre a energia térmica disponibilizada pelo ambiente e aquela contida no corpo líquido resulta o fenômeno da estratificação e desestratificação térmica. Como a energia térmica disponibilizada pelo meio ambiente depende de fatores geográficos e climáticos, pressupõe-se que as características ambientais do local de implantação da lagoa exercem alguma influência sobre o comportamento dessas unidades de tratamento.

O dimensionamento das lagoas de estabilização, tendo como princípio a inter-relação entre o ambiente e essas unidades de tratamento, tem gerado algumas controvérsias entre pesquisadores, principalmente com relação à sua efetiva influência em seu comportamento hidráulico.

Assim, tendo como cenário essas controvérsias e dando continuidade à pesquisa de mestrado (ver KELLNER, 1996) é que se insere esta tese.

O presente trabalho está dividido em capítulos, iniciando com a conceituação da estratificação térmica, seus efeitos sobre o corpo d'água, apresentação dos métodos mais usuais para verificar sua ocorrência e, apresentação de modelo matemático para estimação das diversas formas de energia térmica que atuam sobre a superfície da lagoa. Em seguida, conceitua-se o chamado volume útil da lagoa de estabilização e apresenta-se o modelo matemático para sua estimação, os resultados comparativos entre duas lagoas facultativas com características físicas e de localização geográficas bem diferentes, discutindo-se esses resultados. Por fim, apresenta-se a discussão sobre os principais tópicos abordados no desenvolvimento do trabalho e as principais conclusões.

O trabalho apresentado não tem a finalidade de esgotar o assunto ou propor novo método de dimensionamento para lagoas de estabilização, mas sim, levantar questionamentos sobre a importância do local de implantação, juntamente com suas características climáticas, em relação ao funcionamento e comportamento dessas unidades de tratamento.

2 *OBJETIVOS*

Este trabalho tem como objetivo geral, discutir a influência da estratificação térmica nas lagoas de estabilização assim como a influência que o ambiente exerce sobre esse fenômeno e, conseqüentemente sobre o dimensionamento dessas unidades de tratamento. Como objetivos específicos foram estabelecidos:

- ✓ Desenvolvimento de um modelo matemático aplicável a computadores pessoais, para determinação do perfil de temperatura ao longo da profundidade das lagoas de estabilização;
- ✓ Proposição de fator de correção do tempo de detenção hidráulico baseado no conceito de volume útil;
- ✓ Avaliação dos indicadores de estratificação térmica.

3

O FENÔMENO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA

Estratificação térmica é o nome dado ao fenômeno que mostra clara distinção entre as temperaturas das camadas superficiais e mais profundas dos corpos d'água.

De acordo com ESTEVES (1988, p.129) "...quando as diferenças de temperatura geram camadas de água com diferentes densidades, que em si já formam uma barreira física, impedindo que se misturem, e se a energia do vento não for suficiente para misturá-las, o calor não se distribui uniformemente criando a condição de estabilidade térmica. Quando ocorre este fenômeno, o ecossistema aquático está estratificado termicamente."

Para JIRKA et al. (1980), as variações meteorológicas que ocorrem durante o ano, caracterizadas principalmente pela troca de calor através da superfície líquida, controlam o fenômeno da estratificação térmica em lagoas naturais.

Segundo BIANCHINI Jr. (1999)¹, com base na diferença de densidade da água entre 4°C e 5°C é que define-se a estratificação térmica com gradiente de 1°C/m. Em ambientes aquáticos subtropicais o pesquisador tem utilizado gradiente térmico de 0,6°C/m como valor determinante da estratificação térmica.

No caso de lagoas de estabilização, a literatura sugere que na grande maioria dos casos, a estratificação da coluna líquida é consequência do efeito da temperatura sobre a densidade da água². Essa estabilidade térmica somente pode ser rompida por forças que, atuando sobre a massa líquida, consigam fornecer energia suficiente para provocar a mistura.

¹ BIANCHINI Jr., Irineu. (1999). *Gradiente Térmico*. (informação pessoal) irineu@power.ufscar.br (11/06/1999)

² Convém lembrar que outros fatores, como diferença de salinidade, podem provocar estratificação em um corpo d'água.

Em condições de estabilidade térmica, as distintas camadas de água com densidades diferentes não se misturam (ESTEVES, 1988).

Nesse contexto, a densidade é função da temperatura, variando de maneira não uniforme. A FIGURA 3.1 mostra a variação da massa específica da água com a temperatura.

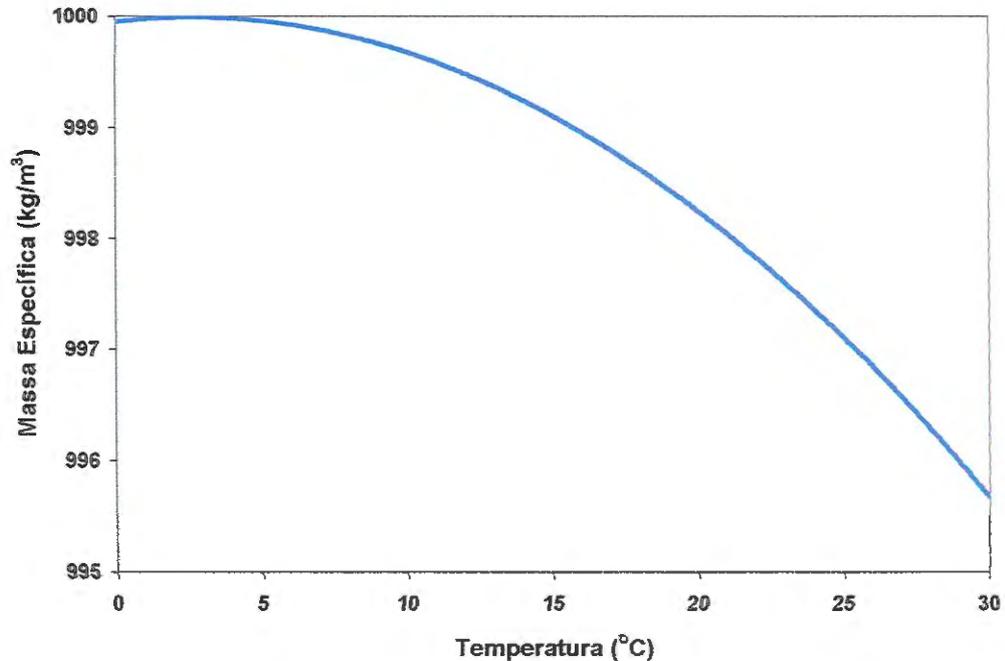


FIGURA 3.1: Variação da massa específica da água em função da temperatura

Nota: Gráfico construído a partir dos dados de HOLMAN (1983).

Para JIRKA et al. (1980) há basicamente dois mecanismos que podem atuar no volume líquido de maneira a estratificá-lo:

- o aumento da radiação solar durante a primavera e o verão causa o aumento da temperatura nas camadas superficiais da lagoa. Este aumento da temperatura é gradualmente propagado para as camadas inferiores pela difusão. Havendo tubulações de saída junto ao fundo da lagoa, pode ocorrer o transporte da energia térmica também por advecção.
- introdução superficial do afluente com densidade inferior ao líquido da lagoa. Dependendo da diferença de densidade podem ocorrer vários caminhos preferenciais de escoamento.

Os maiores responsáveis pelo processo de desestratificação são: instabilidade da camada superficial, a energia cinética do afluente e as forças do vento sobre a superfície líquida.

Segundo JIRKA et al. (1980) a instabilidade nas camadas superficiais provoca uma “virada convectiva”, também chamada de inversão térmica. A razão primária para que isso ocorra, é a diminuição do fluxo de calor através da interface ar-água. Esse decaimento ocorre em ciclo diário (dia-noite) devido às variações do tempo, e em um ciclo anual, devido às estações do ano. O aflente pode causar considerável mistura, dependendo da sua magnitude e da diferença de densidade entre ele e o líquido da lagoa. Segundo GU et al. (1996) o aflente tem dupla função:

- resfriar (durante o verão) ou aquecer (durante o inverno) a água da lagoa, podendo porém, causar a estratificação térmica, caso a temperatura da lagoa seja superior à do aflente (verão), ou caso a temperatura da lagoa seja inferior a do aflente (inverno), respectivamente, em especial se o aflente e a água da lagoa não se misturarem.
- o aflente pode causar alguma turbulência provocando uma mistura, de acordo com a maneira com que é introduzido na lagoa.

Para JIRKA et al. (1980) o efeito do vento na desestratificação da massa líquida é complexo. A formação de ondas cria uma turbulência na camada superficial que propaga-se para as camadas mais internas e menos turbulentas. Este efeito juntamente com a instabilidade convectiva superficial são os maiores responsáveis pela ocorrência da desestratificação.

Segundo ESTEVES (1988), em razão das diferenças de densidade, para desestratificar massas de água com temperatura entre 29°C e 30°C é necessário 37 vezes mais trabalho do vento do que entre 4°C e 5°C (ver TABELA 3.1).

TABELA 3.1: Comparação da densidade da água em diferentes intervalos de temperatura

Temperatura (°C)	Diferença entre Densidades (g/cm ³)	Aumento da resistência à mistura em relação a 4°C -5°C
4-5	0,000008	1 vez
9-10	0,000081	10 vezes
14-15	0,000145	18 vezes
24-25	0,000252	31 vezes
29-30	0,000298	37 vezes

Fonte: Adaptado de ESTEVES (1988).

É interessante observar que esse fenômeno tem importantes conseqüências limnológicas, já que em ambientes aquáticos com temperaturas mais elevadas, não há necessidade de grandes diferenças de temperatura entre as sucessivas camadas para que se processe a estabilização térmica da coluna líquida.

Segundo ESTEVES (1988), a radiação de comprimento de onda maior que 740 nm (principalmente o vermelho e o infravermelho) é fortemente absorvida nas primeiras

camadas da coluna d'água, transformando-se em energia térmica acumulada. Para PORTO (1991), esta rápida absorção da radiação resulta numa significativa diferença de temperatura entre as camadas superficiais e as mais profundas.

DOR et al. (1993) comentam que a estratificação térmica é normalmente verificada em lagos profundos, enquanto que corpos d'água rasos permanecem, geralmente, misturados. Contudo, a alta turbidez das lagoas de estabilização, apesar da pequena profundidade, provoca uma prolongada estratificação durante o verão, a qual pode ser estável ou intermitente, aparecendo apenas durante algumas horas do dia.

A radiação na água está submetida a dois processos básicos: absorção e dispersão. A ação conjunta desses processos é denominada atenuação vertical da radiação, coeficiente de extinção vertical, "... ou menos corretamente de coeficiente de absorção vertical" (ESTEVES, 1988, p.118). Segundo GU et al. (1996) a atenuação da luz na lagoa de estabilização é muito forte e varia com a estação do ano, sendo função da cor, sólidos suspensos totais e da concentração de algas, todos contribuindo significativamente para a estratificação térmica.

Considerando um corpo de água uniformemente transparente e sem nenhum distúrbio que gerasse turbulência, após um determinado período de aquecimento, o perfil vertical de temperatura deveria aproximar-se do perfil vertical de extinção da radiação (PORTO, 1991). Segundo CURTIS³ apud CURTIS et al. (1992), nas lagoas de estabilização de esgotos a luz é "absorvida" exponencialmente. DOR et al. (1993) também verificaram um perfil exponencial para a extinção da luz solar em lagoas de estabilização.

Assim, em uma lagoa de estabilização, a quantidade de energia térmica em uma determinada profundidade da coluna d'água pode ser representada pela seguinte equação:

$$I = I_0 \cdot e^{-kz} \quad (3.1)$$

onde I é a radiação em uma dada profundidade ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); I_0 é a radiação na superfície ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); k é o coeficiente de extinção da luz solar (m^{-1}); e z é a profundidade (m) ⁴.

Normalmente o perfil de temperatura adquire a forma clássica mostrada na FIGURA 3.2, e a coluna líquida tende a dividir-se em 3 distintas camadas de diferentes temperaturas.

³ CURTIS, T.P. (1990). *The mechanics of removal of faecal coliforms from waste stabilization ponds*. Phd Thesis, University of Leeds.

⁴ Neste trabalho será seguida a tradição neste campo de estudo, adotando-se a caloria como unidade de medida de quantidade de calor e não as unidades do sistema internacional (SI).

Essa situação de estabilidade é formada por uma camada superior mais quente e mais leve, e uma camada inferior mais fria e mais densa.

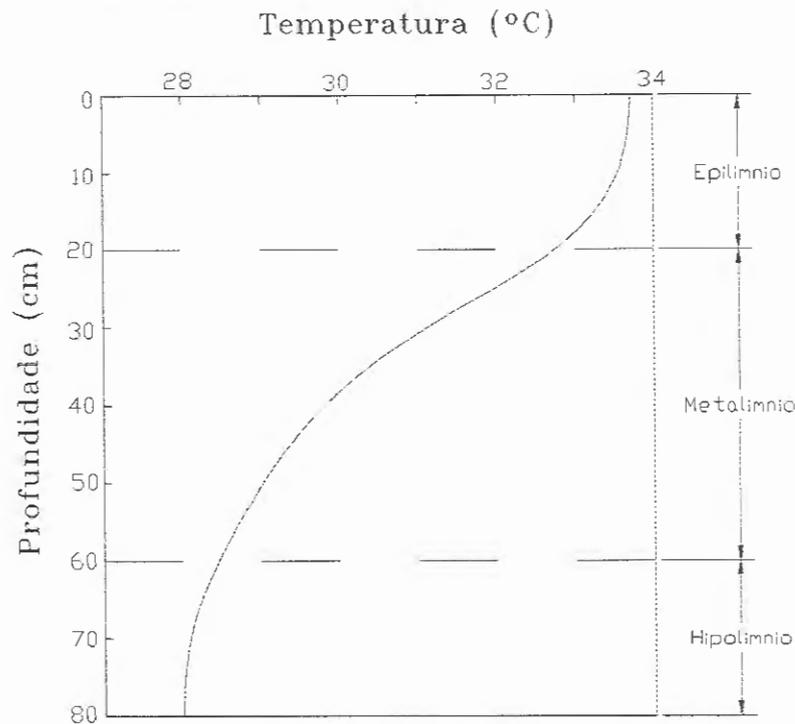


FIGURA 3.2: Perfil vertical de temperatura da lagoa facultativa da cidade de Ramle (Jerusalém)

Fonte: Adaptado de DOR et al. (1993).

A camada superior, chamada de *epilimnio*, é quente, turbulenta e com temperatura uniforme. O *hipolimnio* é a camada inferior que fica junta ao fundo, mais fria e com baixos níveis de turbulência. A camada de transição entre o hipolimnio e o epilimnio é denominada *metalimnio*; é nessa região que encontra-se a termoclina que é o nome dado ao plano imaginário que passa pelo ponto de máximo gradiente no decréscimo da temperatura (PORTO, 1991).

PEDAHZUR et al. (1993) observaram diferenças de temperatura entre a superfície e o fundo de lagoas de estabilização de até 10°C, com gradientes de temperatura entre 1°C a 3°C por 10cm.

Segundo DOR et al. (1993), na estratificação térmica da coluna líquida das lagoas de estabilização observa-se claramente a formação de dois cenários bem característicos, um pouco espesso, rico em oxigênio e iluminado, denominado epilimnio, e outro, mais espesso, escuro e anóxico, o hipolimnio.

Para PEDHAZUR et al. (1993) a estratificação térmica em *lagoas de oxidação* (sic) pode provocar o curto-circuito do afluente diretamente à saída, devido a existência da camada inferior mais fria (mais densa), prejudicando também a eficiência de remoção (e

redução) dos microrganismos entéricos. Segundo VANZO (1990), quando ocorre a estratificação térmica, o tempo de retenção hidráulico real é menor que o tempo de retenção hidráulico teórico, pois a massa do hipolímnio funciona como sendo o fundo da lagoa, diminuindo assim seu volume útil.

NAKAI et al. (1998) conduziram experimento para determinação do tempo de detenção hidráulico das lagoas de estabilização do município de Piratininga – SP utilizando o radio-isótopo ^{82}Br como traçador. Esses pesquisadores relataram que obtiveram picos de concentração do traçador durante o período diurno, provavelmente devido à estratificação térmica.

TORRES et al. (1997) estudaram a influência da estratificação térmica sobre a eficiência na mistura em uma lagoa de estabilização localizada em Espinardo, Campus da Universidade de Murcia, sudeste da Espanha, utilizando sulforodamina B como traçador. No inverno, enquanto a temperatura ambiente não baixou significativamente a temperatura da camada superficial, o volume ativo da lagoa variou da superfície até a profundidade em que a tubulação de saída estava posicionada; porém quando verificaram a queda da temperatura, a zona ativa estendeu-se até o fundo da lagoa. Durante o verão, devido à estável termoclina formada, a zona ativa estendeu-se da superfície até a profundidade onde localizava-se a tubulação de saída do efluente. Os volumes das zonas ativas foram estimados como sendo 70% e 20% do volume total da lagoa durante o inverno e o verão, respectivamente. Para esses valores, os respectivos números de dispersão foram 0,72 e 0,47.

3.1 - Os efeitos da radiação solar para o ambiente aquático.

A principal fonte de energia térmica introduzida nas lagoas de estabilização é o sol (KELLNER, 1996). A energia solar é constituída por ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz (300.000 km/s), com comprimentos de onda entre 100nm e 100.000nm.

Segundo ESTEVES (1988), os comprimentos de onda de maior interesse ecológico compreendem a faixa do visível devido a sua grande importância no processo fotossintético. A faixa do visível é formada por ondas eletromagnéticas com comprimentos de ondas entre 400 e 740 nm, sendo subdivididas em várias faixas, cada uma com comprimentos de ondas específicos (ver TABELA 3.2). Por ser aproximadamente a faixa do espectro sensível ao

olho humano (430 a 690 nm)⁵ é denominada genericamente de luz e em ecologia vegetal de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) por ser a radiação total absorvida pelas clorofilas.

De acordo com ESTEVES (1988), no caso do fitoplâncton (algas), as maiores taxas de absorção concentram-se sobre a região do azul e do vermelho.

DOR et al. (1993) verificaram que lagoas com grandes concentrações de matéria orgânica e clorofila, apresentavam uma maior turbidez, perfil vertical de estratificação térmica mais acentuado e uma maior limitação na penetração da luz solar na coluna líquida.

TABELA 3.2: Comprimentos de onda da radiação fotossinteticamente ativa (RFA)

Cor	Comprimento de onda aproximado (nm)
ultravioleta	<400
violeta	400-424
azul	424-491
verde	491-550
amarelo	550-585
laranja	585-647
vermelho	647-740
infravermelho	>740

Fonte: Adaptado de ESTEVES (1988).

A porção iluminada da coluna d'água recebe o nome de *zona eufótica* e sua extensão depende, principalmente, da capacidade do meio líquido em atenuar a radiação (ESTEVES, 1988). Segundo esse mesmo autor, o limite inferior da zona eufótica é geralmente considerado como sendo aquela profundidade em que a intensidade da radiação corresponde a 1% da que atinge a superfície.

Segundo CEBALLOS et al. (1997) a luz exerce influência na distribuição de algas ao longo da coluna d'água, podendo aumentar a concentração de algas no efluente e, conseqüentemente afetar sua qualidade. Segundo esses pesquisadores, a cor do efluente varia desde "o quase transparente" até o verde escuro, dependendo da hora do dia.

Quando a mistura vertical da massa líquida não ocorre, as algas motoras dirigem-se para a superfície da lagoa em busca de luz e temperaturas mais elevadas (SILVA & MARA, 1979; KELLNER & PIRES, 1998).

Segundo HARTLEY & WEISS⁶ apud KONIG (1990), as algas motoras movem-se pela massa líquida selecionando a profundidade mais adequada para sua atividade fotossintética.

⁵ Segundo HALLIDAY & RESNICK (1986) esses valores são aqueles para os quais a sensibilidade relativa da visão de um suposto observador padrão, cai para 1% de seu máximo.

Segundo ESTEVES (1988) a atenuação é avaliada por meio da medida de redução da radiação com a profundidade na coluna de água.

KELLNER & PIRES (1998) acreditam que na ausência de ventos, o fenômeno de atenuação possa ocasionar um maior armazenamento de energia térmica nas camadas superficiais, ocasionando um aumento da temperatura nessas camadas, tornando mais acentuado o fenômeno da estratificação. Deve-se observar que do ponto de vista térmico, a faixa de comprimento de ondas mais importante é a do infravermelho, pois é nesta faixa que os fenômenos de radiação térmica, às temperaturas usuais na superfície terrestre, são mais intensos.

Do ponto de vista ótico, a transparência da água pode ser considerada o oposto da turbidez. Sua avaliação de maneira mais simples, é feita através da visualização de um disco branco de 20 a 30 cm de diâmetro, denominado disco de Secchi. Esse disco é submergido e é anotada a profundidade em que deixa de ser visível. Segundo PREISENDORFER⁷ apud ESTEVES (1988) a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi é inversamente proporcional à quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos no caminho ótico, ou seja, é a profundidade cuja radiação de 400-740nm não é mais perceptível ao olho humano.

De acordo com ESTEVES (1988), a profundidade do disco de Secchi não fornece dados sobre a qualidade e a quantidade de radiação, porém é possível utilizá-la para o cálculo indireto do coeficiente vertical de atenuação da luz solar.

Segundo POOLE & ATKINS⁸ apud ESTEVES (1988), o cálculo do coeficiente vertical de atenuação, k , empregando-se a profundidade do disco de Secchi pode ser realizado pela relação:

$$k = \frac{1,7}{d_{SD}} \quad (3.2)$$

onde d_{SD} é a profundidade do disco de Secchi (m), k é o coeficiente de atenuação da luz solar (m^{-1}), e 1,7 é a constante calculada.

GU et al. (1996) estudaram a estratificação térmica em lagoas de estabilização rasas. Utilizando sensores, estes pesquisadores mediram a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) durante 16 meses em 3 lagoas de estabilização, localizadas na comunidade de Harris,

⁶ HARTLEY, W.R.; WEISS, C.M. (1970). *Light Intensity and the Vertical Distribution of Algae in Tertiary Oxidation Ponds. Wat. Res.*, v.4, p.751-53.

⁷ PREISENDORFER, R.W. (1986). "Secchi disk science: visual optics of natural waters". *Limnol. Oceanogr.*, 31, 909-926.

⁸ POOLE, H.H.; ATKINS, W.R.G. (1929). Photo-electric measurements of submarine illumination through the year. *Mar. Biol. Ass. V. K.*, 16 (16):297-324.

Minnesota, EUA. Correlacionando os valores medidos dos coeficientes de atenuação da luz solar com a profundidade do disco de Secchi, obtiveram a relação:

$$k = \frac{1,69}{d_{SD}} \quad (3.3)$$

com o coeficiente de correlação linear (R^2) de 0,93, sendo d_{SD} a profundidade do disco de Secchi (m), k o coeficiente de atenuação da luz solar (m^{-1}), e 1,69 a constante calculada.

É interessante observar que, embora POOLE & ATKINS apud ESTEVES (1988) tenham realizados seus estudos em águas marinhas, GU et al. (1996) obtiveram a mesma correlação entre k e d_{SD} trabalhando com lagoas de estabilização.

3.2- A influência da estratificação térmica sobre a qualidade do efluente

Sem dúvida, um dos fatores que exercem grande influência na qualidade dos efluentes de lagoas de estabilização é a estratificação térmica, já que proporciona significativas alterações no meio líquido e conseqüentemente no comportamento da biota.

Com relação à estrutura térmica, quando uma lagoa de estabilização encontra-se estratificada estabelecem-se três zonas bem distintas: epilímnio, metalímnio e o hipolímnio, conforme descrito anteriormente.

No epilímnio, os níveis de oxigênio dissolvido podem, algumas vezes, chegar a valores próximos aos de saturação. O oxigênio é introduzido nessa região pela produção fotossintética ou pela troca gasosa através da interface ar-água.

Abaixo da termoclina fica evidenciado uma região escura e pouco turbulenta, o hipolímnio, que associada à estabilidade térmica proporcionada pela estratificação prolongada, impede a chegada do oxigênio até as camadas inferiores. Além disso, a pouca luminosidade nessa região não permite a ocorrência da fotossíntese, reduzindo então a concentração de oxigênio dissolvido disponível na região.

Segundo SILVA & MARA (1979), devido a ausência de ventos, as algas não-motoras sedimentam-se e, por não realizarem fotossíntese, morrem e são decompostas. Essa decomposição passa a ser anaeróbia havendo produção de gás sulfídrico e metano, além de haver uma queda no pH do hipolímnio, conforme verificado por VIDAL (1983), LLORENZ et al. (1993) e vários outros pesquisadores.

A literatura tem relatado vários fatores que garantem o decaimento bacteriano: altas temperaturas (SILVA & MARA, 1979; PEARSON et al., 1987); a incidência de raios UV na água; a concentração de oxigênio dissolvido, altos valores de pH (PEARSON et al., 1987) e sedimentação (GANNON et al.⁹ apud FERNÁNDEZ et al., 1992). Para KONIG et al. (1991), as reduções de coliformes fecais são resultantes do efeito sinérgico de todos esses fatores.

PEARSON et al. (1987), monitorando os efluentes de lagoas de estabilização em Portugal, sugeriram que o pH é a principal característica associada à morte dos organismos patogênicos. Eles observaram que o pH com valores iguais ou superiores a nove aceleram o decaimento de coliformes fecais em lagoas de estabilização. Além disso, PEARSON et al. (1987) sugeriram que o aumento da temperatura também influencia a eliminação de patogênicos, uma vez que estimula as atividades metabólicas das algas e conseqüentemente a susceptibilidade às substâncias tóxicas produzidas. Verificaram ainda que o número de coliformes fecais diminuía à medida que aumentava a concentração de oxigênio dissolvido e os valores do pH. Esta última observação também foi verificada por FERNÁNDEZ et al. (1992).

PEARSON & KONIG (1986) mencionam que, em lagoas facultativas, o número de coliformes fecais é pequeno próximo à superfície, aumentando logo abaixo da camada de algas.

3.3 - A influência dos aspectos climáticos no balanço de energia térmica das lagoas

A transferência de energia pela interface ar-água é de fundamental importância na ocorrência da estratificação térmica. Este processo de troca interfere na temperatura da água e, portanto, na condição de mistura do volume líquido.

A temperatura de um corpo de água é uma função da radiação de ondas curtas, radiação atmosférica, radiação da superfície da água, evaporação, temperatura do afluente e da condução. A FIGURA 3.3 mostra esquematicamente a energia térmica que entra e sai pela superfície da lagoa de estabilização.

⁹ GANNON, J.J.; BUSSE, M.K.; SCHILLINGER, J.E. (1983). Fecal coliform disappearance in a river impoundment. *Wat. Res.* Vol 17, 1595-1601.

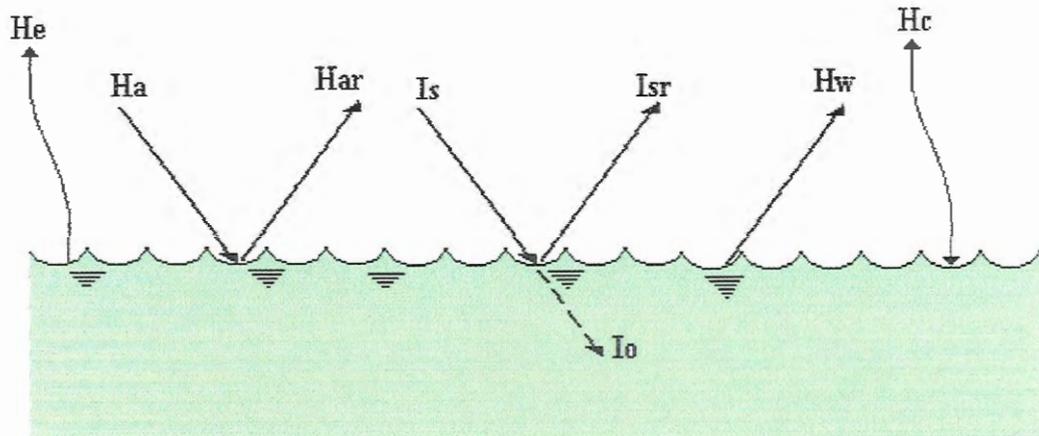


FIGURA 3.3: Troca da energia térmica sobre a superfície da lagoa devido às condições climáticas.

NOTA: I_s é a radiação solar de ondas curta incidente, H_a é a radiação atmosférica de ondas longas, I_{sr} é a radiação solar de ondas curtas refletida; H_{ar} é a radiação atmosférica de ondas longas refletida; H_e é a perda de energia por evaporação; H_c é a perda ou ganho de energia por condução/convecção e, H_w é a radiação de ondas longas emitida pela água.

O balanço térmico no corpo d'água pode ser calculado pela eq.(3.4):

$$H_{net} = I_s + H_a - (I_{sr} + H_{ar} + H_w + H_e + H_c) \quad (3.4)$$

onde I_s é a radiação solar de ondas curta ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$); H_a é a radiação atmosférica de ondas longas ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$); I_{sr} é a radiação solar de ondas curtas refletida ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$); H_{ar} é a radiação atmosférica de ondas longas refletida ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$); H_e é a perda de energia por evaporação ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$); H_c é a perda ou ganho de energia por condução/convecção ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$) e, H_w é a radiação de ondas longas emitida pela água ($cal.cm^{-2}.dia^{-1}$).

O valor positivo para H_{net} indica que o calor está sendo introduzido e um valor negativo indica que o calor é retirado do corpo d'água.

3.3.1 - Radiação solar de ondas curtas: I_s e I_{sr}

Segundo FRITZ et al. (1980), a radiação solar de ondas curtas é um dos principais componentes de entrada do balanço de energia para lagoas de estabilização, e deve ser obtido por medida direta ou, quando a medida direta não for possível, deve ser calculada. Grosseiramente, 99% da radiação solar de ondas curtas é encontrada entre os comprimentos

de onda de $0,14 \mu\text{m}$ e $4,00 \mu\text{m}$. Contudo, apenas uma porção chega à superfície da Terra sendo refletida, absorvida e dispersada pela atmosfera. Esta fração transforma-se em radiação de ondas longas.

A magnitude da radiação solar que chega a superfície da água pode ser calculada como uma função da latitude, longitude, altitude solar, fração de cobertura do céu por nuvens, dia do ano e hora do dia.

Segundo WUNDERLICH¹⁰ apud FRITZ et al. (1980) a radiação solar líquida de ondas curtas pode ser determinada pela equação:

$$I_s = \frac{I_{sc}}{r^2} \cdot (\text{sen } \alpha) \cdot A_t^m \cdot (1 - 0,65 \cdot C^2) \quad (3.5)$$

sendo I_s a radiação solar de ondas curtas que chega à superfície da água ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); I_{sc} a constante solar ($2880 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); α a altitude solar (graus); r o raio adimensionalizado da órbita da Terra; A_t o coeficiente de transmissão atmosférica; m a massa ótica de ar e C a fração de cobertura do céu por nuvens.

Como a órbita da Terra é quase circular¹¹, tendo porém o Sol deslocado de seu centro, é necessário calcular o raio orbital normalizado para um determinado dia do ano, o qual pode ser feito empregando-se a eq.(3.6):

$$r = 1 + 0,017 \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (186 - D_t) \right] \quad (3.6)$$

onde D_t é o dia Juliano do ano (1 a 365).

A posição do Sol relativa à superfície da Terra é definida como altitude solar que é função da declinação do Sol, da latitude do local e do ângulo horário. A altitude solar (ver eq. 3.7) é medida entre o plano do horizonte do observador e o plano contendo o círculo horário solar e é calculado a partir da lei dos cosenos e da geometria esférica (FIGURA 3.4)

¹⁰ WUNDERLICH, W.O. (1976). *Heat and Mass Transfer Between a Water Surface and the Atmosphere*. Lab. Report. N.14. TVA. Engineering Laboratories, Norris, Tenn.

¹¹ Segundo o IAG (1985), tem-se 1471.10^5 km no perihélio e 1521.10^5 km no afélio, sendo a distância média entre o Sol e a Terra de 1496.10^5 km .

no comprimento dos dias. Conhecida como “equação do tempo”, essas variações dependem da hora local e do meridiano padrão.

O tempo solar verdadeiro, t_s , é calculado pela equação:

$$t_s = H_L + \frac{\psi}{15} + \xi \quad (3.10)$$

onde H_L é a hora local do meridiano padrão¹² (0 até 24 horas); ψ é a longitude do local (graus), e ξ é a “equação do tempo”, podendo ser obtida a partir do gráfico apresentado na FIGURA 3.5.

Segundo GARG & DATTA (1993), a “equação do tempo” é o nome dado à diferença entre a hora solar verdadeira e a hora solar média, podendo-se entendê-la como um fator de correção que varia de +16,3 a -14,4 minutos.

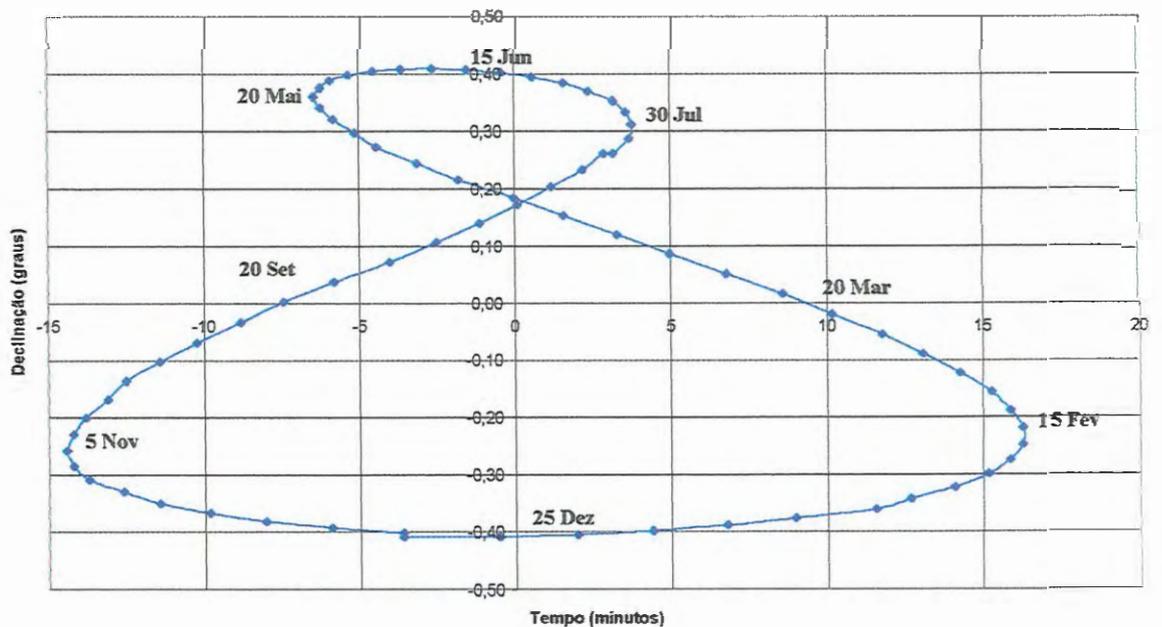


FIGURA 3.5: Analena
Fonte: GARG & DATTA (1993).

Como a radiação solar passa por uma massa de ar antes de chegar à superfície da Terra, um fator de redução solar é incorporado à eq. (3.5). A massa ótica de ar é uma função da pressão barométrica e da altitude do local, sendo empiricamente definida como:

¹² O meridiano padrão adotado internacionalmente é Greenwich (Inglaterra).

$$m = \frac{1}{\sin \alpha + a \cdot (\alpha + b)^{-c}} \cdot \left[\frac{288 - 0,0065 \cdot Z}{288} \right]^{5,256} \quad (3.11)$$

onde m é a constante ótica da massa de ar; Z é a altitude do local (m); α é a altitude solar (rad); a , b , c são constantes cujos valores são, respectivamente, 0,15; 3,885 e 1,253 (FRITZ et al., 1980).

Assim, o coeficiente de transmissão atmosférica, A_t , é função da posição geográfica e do dia do ano. Vários valores para A_t tem sido reportados, de 0,7 (HAMON et al, 1954) até 0,97 (KENNEDY, 1949), mas para o estudo desenvolvido por FRITZ et al. (1980) foi aplicado a eq. (3.12) desenvolvida por YU (1977)¹³ para o lago Erie a partir da regressão da equação, com A_t como variável dependente.

$$A_t = 0,0685 \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (D_t + 10) \right] + 0,80 \quad (3.12)$$

Uma parte da radiação solar de ondas curtas, calculada pela equação (3.5) será refletida pela superfície da água. Assim, o valor líquido da radiação que chega à superfície da água (I_o) é dado por:

$$I_o = I_s \cdot (1 - A \cdot \alpha^B) \quad (3.13)$$

onde α é a altitude solar (graus). O termo $A \cdot \alpha^B$ é o albedo da água, que descreve as propriedades de reflexão.

Os valores A e B dependem das condições de cobertura do céu pelas nuvens e estão apresentados na TABELA (3.3).

TABELA 3.3: Valores das constantes A e B em função da condição do céu

Condição do Céu	C	A	B
limpo	$\leq 0,1$	1,18	-0,77
nuvens dispersas	$0,1 < C \leq 0,5$	2,20	-0,97
nuvens "quebradas"	$0,5 < C \leq 0,9$	0,95	-0,75
nublado	$> 0,9$	0,35	-1,45

Fonte: FRITZ et al. (1980).

C - taxa de cobertura do céu por nuvens.

¹³ YU, P. (1977). *A heat budget for lake Erie*. Thesis presented to the State University of New York at Buffalo in partial fulfillment for the degree of Master of Science.

3.3.2 - Radiação atmosférica líquida de ondas longas: H_a e H_{ar}

Proveniente do CO_2 e do vapor d'água presentes na atmosfera, a radiação atmosférica de ondas longas (H_a), é uma das maiores responsáveis pela taxa de calor. Embora seja difícil de medi-la devido aos gradientes térmicos e a não-homogeneidade atmosférica, pode-se dizer que a radiação atmosférica de ondas longas é a maior fonte de introdução de energia calorífera nos corpos d'água durante a noite ou dias nublados.

Várias formulações estão baseadas na lei da quarta potência de Stefan-Boltzman descrita pela equação:

$$H = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (3.14)$$

onde ε_a é a emissividade média da atmosfera; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\cong 2,11 \text{ cal.cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-4} \cdot \text{dia}^{-1}$) e, T_a é a temperatura absoluta do ar (K).

A radiação de ondas longas refletidas (H_{ar}) é apenas função do albedo da superfície da água, usualmente 0,02, por isso seu comportamento é quase como o de um corpo negro. SWINBANK (1963) propôs a fórmula que fornece a radiação atmosférica líquida de ondas longas (H_{an}), que é $H_a - H_{ar}$, como função da temperatura absoluta e da nebulosidade:

$$H_{an} = 1,07 \cdot 10^{-12} \cdot (273 + T_a)^6 \cdot (1 + 0,17 \cdot C^2) \quad (3.15)$$

onde H_{an} é a radiação atmosférica líquida de ondas longas ($\text{cal.cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$), T_a é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), e C é a fração de cobertura do céu por nuvens (dec.).

A emissividade descrita na eq. (3.14) relaciona a radiação emitida de uma superfície cinzenta (não ideal) com a emitida por uma superfície negra ideal. Segundo HOLMAN (1983) a emissividade das substâncias variam significativamente com o comprimento de onda, a temperatura e a condição da superfície. Embora SWINBANK (1963) não tenha especificado a função de variação da emissividade, acredita-se que esteja relacionada a Ta^2 e C^2 .

Segundo FRITZ et al. (1980), a equação (3.14) é válida para temperaturas superiores a 4°C , sendo necessário, para aplicá-la, conhecer os valores da temperatura do ar e a fração de cobertura por nuvens do local, para qualquer dia do ano.

3.3.3 - Radiação de ondas longas emitida pela água: H_w

A radiação de ondas longas que deixa o corpo d'água (H_w), é também um importante componente da taxa de calor, comportando-se de acordo com a lei da quarta potência de Stefan-Boltzman, conforme estabelecido pela eq. (3.13). Tanto o valor usado para emissividade, aproximadamente 0,97 quanto para a temperatura referem-se à superfície da água. RYAN & STOLZEMBACH (1972) estabeleceram que a radiação de ondas longas emitidas pela superfície da água pode ser calculada como:

$$H_w = 1,0 \cdot 10^{-7} \cdot (T_s + 273)^4 \quad (3.16)$$

sendo H_w a radiação de ondas longas emitida pela superfície da água ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), e T_s a temperatura da superfície da água ($^{\circ}\text{C}$).

3.3.4 - Perda da energia térmica por evaporação: H_e

Segundo FRITZ et al. (1980), a exposição de um corpo d'água a uma certa quantidade de energia provoca um aumento da energia cinética das moléculas desse corpo até o ponto em que algumas são capazes de escapar para a atmosfera, passando pela interface água-ar. Assim, parte da energia que é fornecida a um corpo d'água é utilizada para evaporar moléculas de água. A quantidade de calor absorvida por unidade de massa para passagem do estado líquido para o estado gasoso, ou estado de vapor, é chamado de calor latente de vaporização.

Ainda segundo FRITZ et al. (1980), com o prosseguimento da evaporação ocorre um aumento da pressão de vapor sobre a superfície da água até ser atingida a pressão de vapor de saturação. Assim, a taxa de evaporação depende da diferença entre a pressão de vapor da atmosfera e a pressão de vapor de saturação na temperatura local (lei de Dalton)¹⁴. O vento contínuo remove a camada de ar saturado que se forma sobre a superfície líquida aumentando as taxas de evaporação. Conclui-se portanto que a evaporação depende da

¹⁴ No ano de 1807, Dalton publicou sua teoria atômica e nela, a lei das proporções definidas: "Para formar um certo composto, seus elementos constituintes combinam-se sempre nas mesmas proporções em peso, independentemente da origem ou do modo de preparação do composto.". MAHAN (1988).

temperatura do ar, da pressão de vapor, da umidade relativa e da velocidade do vento sobre a superfície da lagoa.

A perda de energia por evaporação pode ser calculada usando a fórmula do lago Hefner modificada por MARCIANO & HARBECK¹⁵ apud FRITZ et al. (1980) para pequenos lagos e recomendado por RYAN & STOLZENBACH (1972)

$$H_e = 2,9 \cdot V_v \cdot (e_s - e_a) \quad (3.17)$$

onde H_e é a perda de energia térmica pela evaporação ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); V_v é a velocidade do vento (km.h^{-1}); e_s é a pressão parcial de vapor à temperatura da superfície da água T_s (mm Hg) e e_a é a pressão parcial de vapor a 2,0m acima da superfície da água (mm Hg).

Quando não se dispõe das pressões de vapor elas podem ser calculadas como função da temperatura do ar e da água como segue (TROXLER & THRACKSTON, 1977).

$$e_s = 25,374 \cdot \exp \left[17,62 - \frac{5271}{(T_s + 273)} \right] \quad (3.18)$$

$$e_a = R_h \cdot 25,374 \cdot \exp \left[17,62 - \frac{5271}{(T_a + 273)} \right] \quad (3.19)$$

onde R_h é a umidade relativa do ar (dec.).

3.3.5 - Transferência de calor por condução/convecção: H_c

Sempre que há diferença de temperatura entre a água e o ar, a transferência de calor sensível dá-se pelo processo de condução, independentemente de haver movimentação das massas de ar e água. Por outro lado, a movimentação provoca troca de calor por convecção.

Além da diferença de temperatura, a quantidade de calor trocado depende também da velocidade do vento. Essa troca de calor sensível pode ocorrer por difusão, molecular ou turbulenta. Assim, o cálculo da transferência de calor por condução e convecção pode ser estimado pela equação empírica:

¹⁵ MARCIANO, J.J.; HARBECK, G.E. (1954). *Mass transfer studies*, Professional Paper N. 269, Part of "Water Loss Investigations-Lake Hefner Studies", Tech. Report U.S.G.S., 46-70.

$$H_c = 0,90 \cdot V_v \cdot (T_s - T_a) \quad (3.20)$$

onde H_c é o calor ganho ou perdido pela água devido a condução ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e, V_v é a velocidade do vento (km.h^{-1}).

A rapidez com que a troca de energia será efetivada é expressa pela condutividade térmica do meio, aqui representado pelo termo $(0,90 \cdot V_v)$.

Finalmente, a energia térmica que entra ou sai do corpo d'água pode ser calculada pela equação:

$$H_{net} = I_o + H_{an} - (H_w + H_e + H_c) \quad (3.21)$$

sendo que as duas primeiras parcelas desse balanço representam a parcela da energia disponível, afetada apenas por fenômenos meteorológicos. A lagoa receberá essa quantidade de radiação independente da sua temperatura. Já as últimas três parcelas dependem da temperatura da superfície da água, da temperatura do ar, pressão de vapor e da velocidade do vento.

3.4 - Avaliação da eficácia do modelo matemático na previsão da radiação solar de ondas curtas (I_o) e na radiação líquida (H_{net})

Com o objetivo de avaliar o modelo teórico empregado para estimar a radiação solar de ondas curtas (I_o), assim como para a determinação da radiação líquida (H_{net}) incidente na superfície da lagoa, obteve-se os valores da temperatura do ar, temperatura da água, velocidade do vento, radiação solar de ondas curtas, insolação, pressão atmosférica e umidade relativa do ar a partir de dados medidos em campo pelo CRHEA - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo, instalado junto à represa do Broa, município de Itirapina - SP, referente ao ano de 1995.

A FIGURA 3.6 mostra os valores teóricos da radiação de ondas curtas (I_o), calculados pela eq. (3.13) e os valores medidos em campo.

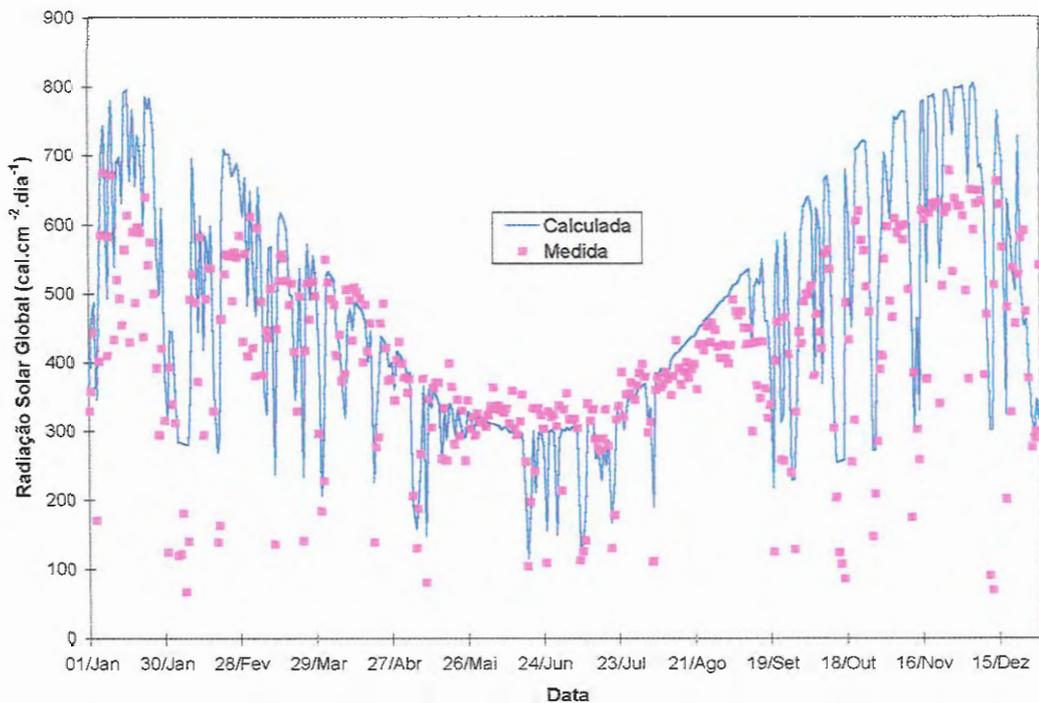


FIGURA 3.6: Variação da radiação solar de ondas curtas (I_0) ao longo do ano de 1995.

Conforme mencionado anteriormente, os valores das variáveis A e B que aparecem na eq. (3.13), dependem da fração de cobertura do céu (C), verificada durante um determinado dia.

Dessa maneira, para determinar o valor de C , calculou-se a relação entre o número de horas de insolação (obtido experimentalmente a partir de um Heliógrafo), e o número teórico de horas que o Sol está sobre o horizonte (calculado pela diferença entre a hora do por do Sol e do seu nascer). Calculado o valor de C , obteve-se os valores de A e B apresentados na TABELA 3.3.

Analisando o gráfico de I_0 ao longo do ano de 1995 mostrado na FIGURA 3.6, é possível observar que os valores previstos foram bons, já que na maioria dos meses do ano, os dados observados aderiram à curva calculada. No entanto, no primeiro e último mês do ano, verificou-se que os valores da radiação calculados superaram os valores observados.

Essa diferença pode ter sido ocasionada pela imprecisão do cálculo da radiação de ondas curtas (eq. 3.13) ou mesmo pela determinação errônea da fração de cobertura do céu (C) e conseqüentemente pela escolha dos parâmetros A e B .

A imprecisão do modelo matemático pode ser melhor avaliada a partir da observação do gráfico apresentado na FIGURA 3.7.

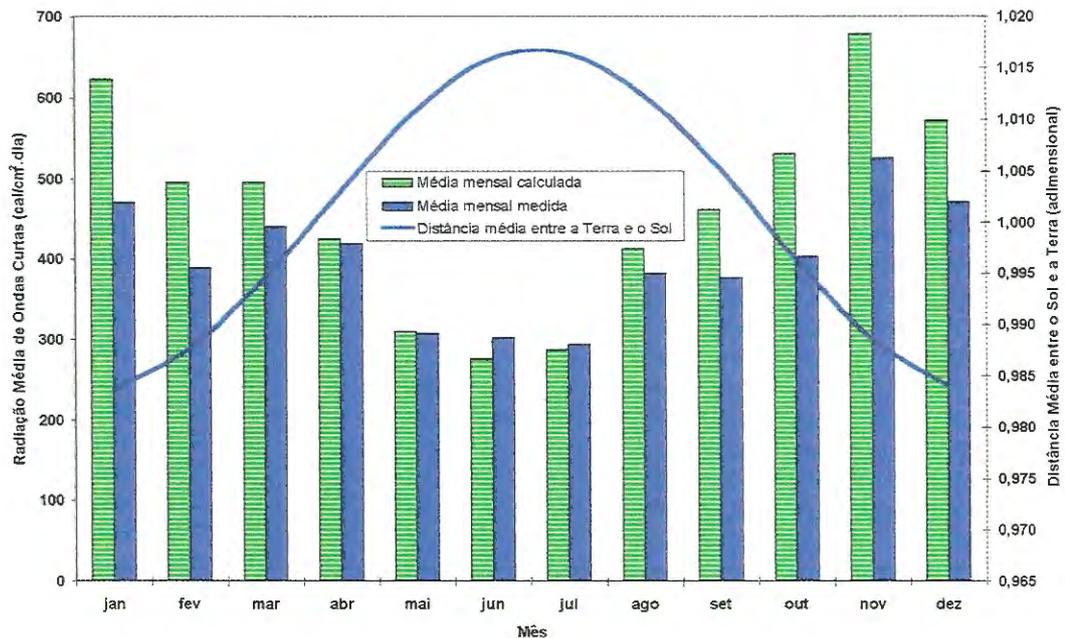


FIGURA 3.7: Radiação média de ondas curtas e a variação da distância adimensional entre a Terra e o Sol

Observando a FIGURA 3.7 verifica-se que, tanto no começo quanto no final do ano, a distância média adimensional entre a Terra e o Sol atinge seus valores mínimos, enquanto que nos meses de junho e julho essa mesma distância atinge seus valores máximos.

Como a radiação solar líquida de ondas curtas é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a Terra e o Sol, equivale a dizer que a energia térmica referente às ondas curtas é maior, no hemisfério Sul, nos meses de janeiro e dezembro (verão), decaindo durante os outros meses do ano, atingindo valores mínimos entre junho e julho (inverno).

Do gráfico de barras mostrado na FIGURA 3.7 é possível observar que durante os primeiros e últimos meses do ano, o cálculo da média da radiação solar de ondas curtas superou em até 20% os valores observados; já durante os meses de junho e julho a radiação solar média de ondas curtas calculada pelo modelo ficou abaixo dos valores observados pelo CRHEA. Porém a diferença foi significativamente menor, em torno de 4%.

Isso permite afirmar que o incremento feito à distância média entre o Sol e a Terra pode não ser representada exatamente por uma cossenóide defasada (ver equação 3.6).

Outro fator que pode representar algum erro aos cálculos, é o fato de se ter considerado a Terra uma esfera perfeita, com raio igual ao raio médio da Terra.

Afim de corrigir essa distorção no cálculo da energia térmica de ondas curtas (I_o), determinou-se uma função de correção a ser aplicada à eq.(3.13).

Com os dados do número de horas de insolação medidos em campo, determinou-se a taxa de cobertura do céu por nuvens (C), e com ela fixou-se os parâmetros A e B apresentados na TABELA 3.3. Aplicando esses valores e aqueles da radiação solar de ondas curtas (I_o) medidos em campo, e os valores calculados da altitude solar (α) à eq.(3.13) calculou-se a radiação solar líquida de ondas curtas corrigida (I_s^*).

Dividindo-se a radiação solar líquida de ondas curtas calculada (I_s) pela radiação solar líquida de ondas curtas corrigida (I_s^*), encontrou-se o adimensional corretivo (ζ) para cada dia do ano. A esses pontos foi aferida uma curva cossenoidal conforme pode ser observado no gráfico da FIGURA 3.8.

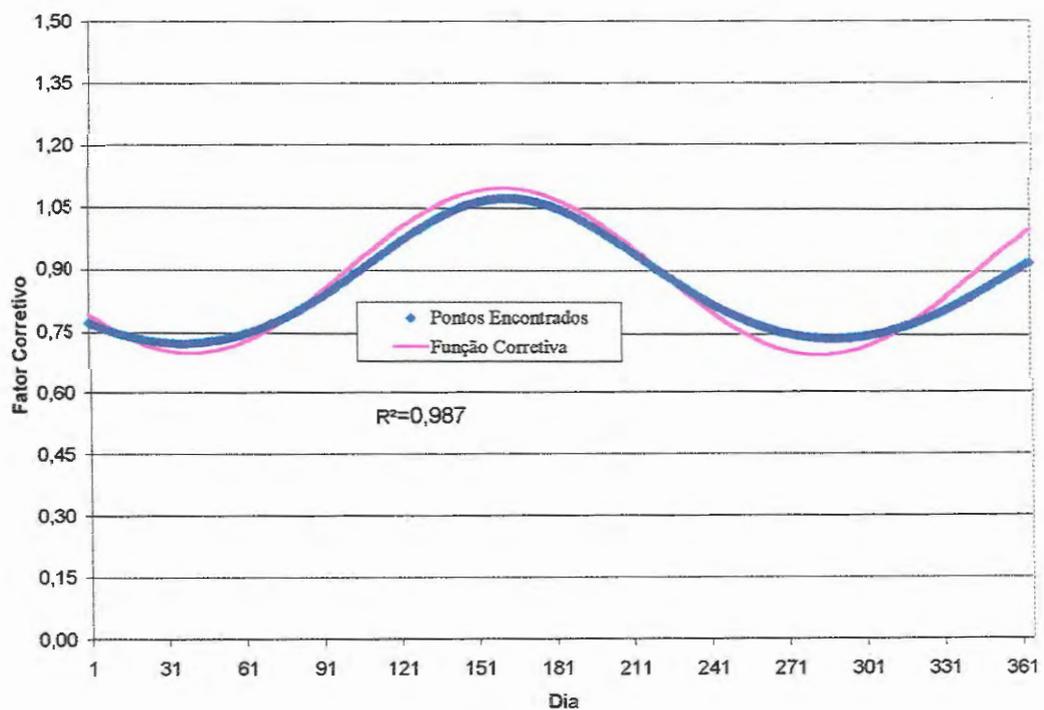


FIGURA 3.8: Função Correção (ζ)

A função correção (ζ) encontrada é representada pela eq. (3.22):

$$\zeta = 0,9 - 0,2 \cdot \cos\left[\left(\frac{3 \cdot \pi}{365}\right) \cdot (40 - D_t)\right] \quad (3.22)$$

onde D_t é o dia do ano.

Assim, uma maneira para corrigir a equação de cálculo da radiação solar de ondas curtas (I_o) para os dados relativos a represa do Broa, pôde ser conseguido aplicando-se o fator de correção à equação (3.13), conforme representado pela equação (3.23).

$$I_o = \zeta \cdot I_s \cdot (1 - A \cdot \alpha^B) \quad (3.23)$$

Calculando-se novamente a radiação média de ondas curtas para os doze meses do ano aplicando-se o fator corretivo (ζ), obteve-se outros valores mais próximos daqueles medidos *in loco*, conforme pode ser observado pelo gráfico mostrado na FIGURA 3.9.

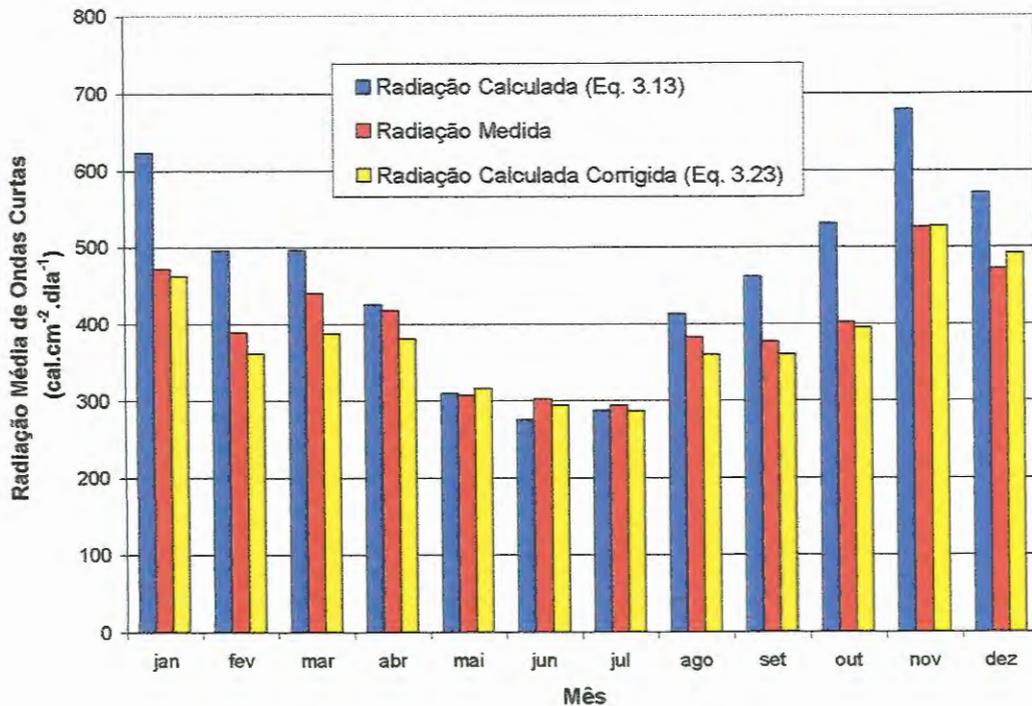


FIGURA 3.9: Comparação entre a radiação média de ondas curtas medida, calculada pela eq.(3.13) e pela eq.(3.23)

Comparando-se os resultados da radiação média de ondas curtas corrigido com os valores medidos em campo, observou-se que em nove meses do ano, o erro relativo foi da ordem de 3%, em outros três meses inferior a 10% e no mês restante o erro relativo foi calculado em 13%.

A partir dos dados de temperatura do ar, temperatura da água, velocidade do vento, radiação solar de ondas curtas, insolação, pressão atmosférica e umidade relativa do ar, empregando-se as equações de (3.13) a (3.20), obteve-se os valores da radiação atmosférica de ondas longas (H_{an}), radiação de ondas longas emitidas pela água (H_w), energia térmica perdida pela evaporação (H_e), radiação de ondas curtas que penetra na superfície da água (I_o), a variação da energia térmica decorrente da transferência de calor por condução (H_c) e, a

energia térmica que entra ou sai do corpo d'água (H_{net}). A FIGURA 3.10 mostra graficamente a variação dessas energias térmicas ao longo do ano de 1995.

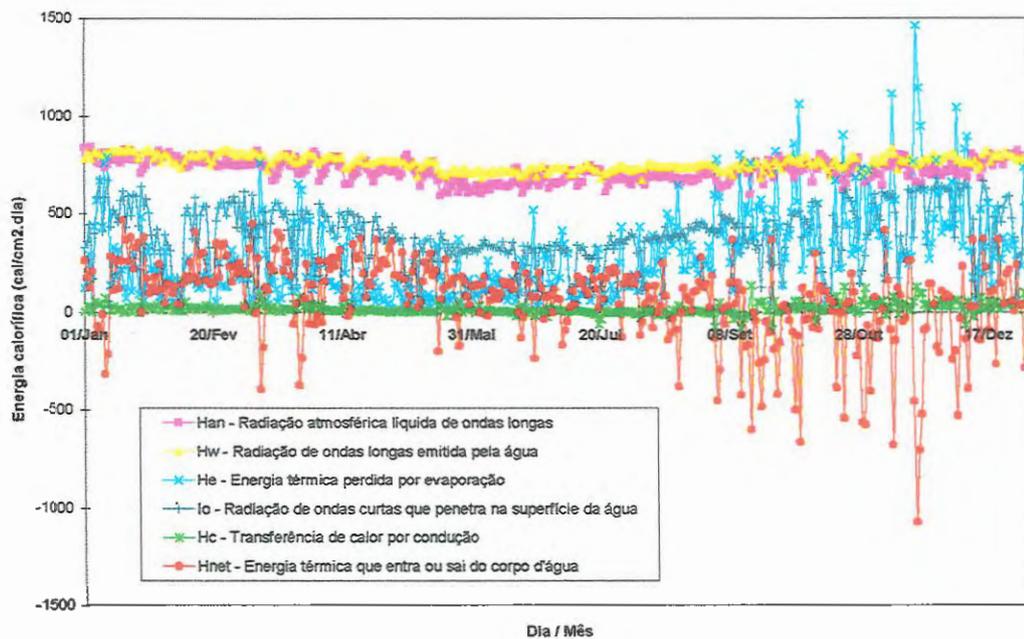


FIGURA 3.10: Balanço de energia térmica a partir dos dados obtidos pelo CRHEA na represa do Broa.

A partir da FIGURA 3.10 é possível fazer algumas observações referente ao balanço de energia térmica em um corpo d'água.

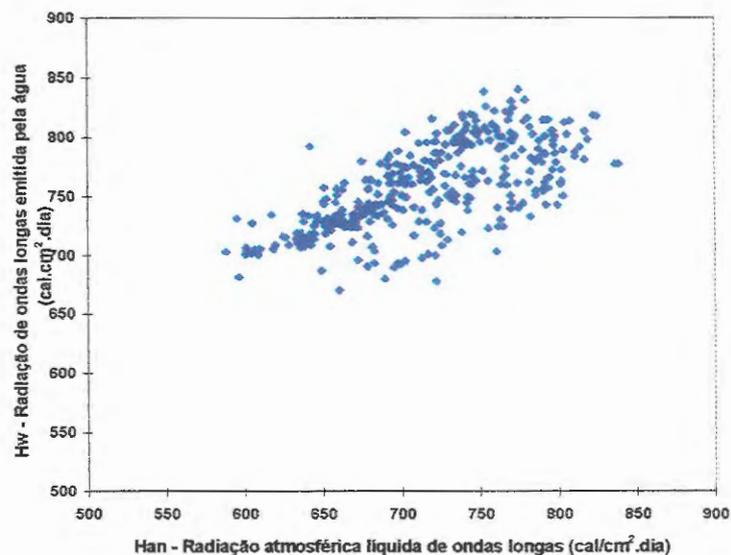


FIGURA 3.11: Relação entre a radiação atmosférica líquida de ondas longas (H_{an}) e a radiação de ondas longas emitida pela água (H_w) - Represa do Broa/1995

A radiação atmosférica líquida de ondas longas (H_{an}) apresenta a mesma magnitude em relação a radiação de ondas longas emitida pela água (H_w) — ver FIGURA 3.11. Esse resultado já era esperado pois, H_{an} é função da temperatura do ar (T_{ar}) e da fração de cobertura do céu (C), enquanto H_w é função da temperatura da superfície da água (T_s).

Como a temperatura superficial da água apresenta um alto coeficiente de correlação linear (R^2) com a temperatura do ar, já era de se esperar que H_{an} e H_w tivessem comportamento semelhantes. A FIGURA 3.12 mostra a correlação existente entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície da água para a represa do Broa no ano de 1995.

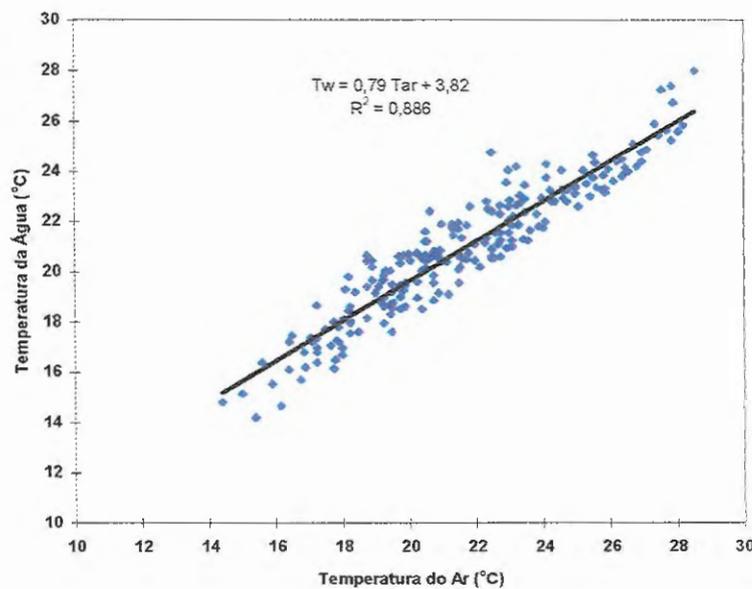


FIGURA 3.12: Correlação entre a temperatura do ar (T_{ar}) e temperatura da superfície da água (T_s) - Represa do Broa/1995

A taxa de transferência de calor por condução (H_c) é função da velocidade do vento (V_v) e da diferença entre a temperatura da superfície da água (T_w) e da temperatura do ar (T_a), eq. (3.20). Como a diferença entre T_s e T_a , tanto para lagoas de estabilização quanto para reservatórios de águas naturais, em geral, são muito pequenos, para velocidades usuais de vento este termo é praticamente desprezível. Sendo assim, a energia líquida que entra ou sai do corpo d'água (H_{net}) praticamente resume-se na diferença de I_o e H_e (ver equação 3.20).

A energia térmica perdida pela evaporação (H_e) é função da velocidade do vento (V_v), da pressão de vapor de saturação para a temperatura da superfície da água (e_s), da pressão de vapor na camada de vapor de saturação na temperatura do ponto de orvalho do ar ambiente (e_a) e da umidade relativa do ar (R_h). Por sua vez I_o é função de vários parâmetros,

dentre eles, da latitude do local (ψ), do dia do ano, da hora do dia, da declinação do sol (δ), da fração de cobertura do céu por nuvens (C), etc.

Em geral, quando a perda de energia térmica devido a evaporação (H_e) supera a energia térmica proveniente da radiação de ondas curtas que penetra a superfície do corpo d'água (I_o), o corpo líquido perde calor e H_{net} passa a ter valor negativo.

Ao perder energia térmica, a camada superficial do volume d'água é resfriada, conseqüentemente a temperatura diminui tornando essa camada mais densa; dessa maneira ocorre um fenômeno denominado “virada convectiva”, conforme mencionado por JIRKA et al. (1980).

Essa “virada convectiva” proporciona uma mistura vertical do corpo d'água e representa um dos principais mecanismos de desestratificação das lagoas de estabilização.

Porém, quando H_{net} possuir valor positivo, significa que a lagoa, ou o volume d'água está recebendo constantemente energia térmica, proporcionando o aumento da temperatura das camadas superficiais. Quando esse fenômeno persiste por muito tempo ocorre a estratificação térmica duradoura.

Vários pesquisadores têm relatado a ocorrência de estratificação durante o verão e a desestratificação durante o inverno.

LLORENS et al. (1992) estudando a influência da estratificação térmica numa lagoa de estabilização profunda, localizada no Campus da Universidade de Murcia, no sudoeste da Espanha, próximo da costa do Mediterrâneo, verificaram que o perfil de temperatura variou da condição homogeneizada (no inverno) até o estado estratificado (primavera-verão), voltando a condição de homogeneidade térmica no outono-inverno.

GU et al. (1996) ao avaliarem a dinâmica da estratificação térmica nas lagoas de Harris, região central de Minnesota-EUA, identificaram diferencial de temperatura de 10°C entre o dia e a noite. Pela manhã, a forte radiação solar típica dos dias claros de verão, aquecia as camadas superficiais, provocando a estratificação da coluna líquida. Durante a noite, as lagoas retornavam para condição de mistura parcial ou completa. Esses pesquisadores observaram também que, nos dias em que a radiação solar era reduzida devido a nebulosidade, o grau de estratificação era menor.

3.5 - Comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização e sua influência na estratificação térmica

Quando uma lagoa de estabilização encontra-se estratificada ocorre a formação de um gradiente de densidade, e a mistura interna vertical é prejudicada. Nesse momento, o

volume líquido comporta-se como uma série de camadas líquidas, de diferentes densidades, permanecendo estáveis numa determinada profundidade, ou seja, quanto mais denso mais próximo do fundo.

Este cenário mostra que na ocorrência da estratificação térmica, o centro de massa do volume líquido é deslocado para baixo, mais próximo ao fundo.

Segundo PORTO (1991), a energia potencial do volume líquido é matematicamente definida pela equação :

$$EP = m \cdot g \cdot H = \int_0^H z \cdot g \cdot (A_z \cdot \rho_{z,T}) \cdot dz \quad (3.24)$$

sendo z a distância entre o fundo da lagoa e o centro de massa da respectiva camada (m); g a aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$); A_z a área horizontal da camada referente à profundidade z (m^2); $\rho_{z,T}$ a densidade da água referente a profundidade z e à temperatura T ($kg \cdot m^{-3}$); H a profundidade da lagoa (m); e m a massa total de água da lagoa (kg).

Assim, quando o volume d'água encontra-se desestratificado, o centro de massa da lagoa coincide com o centro geométrico.

A FIGURA 3.13 mostra esquematicamente a variação da energia potencial de um volume líquido estratificado e um volume líquido completamente misturado.

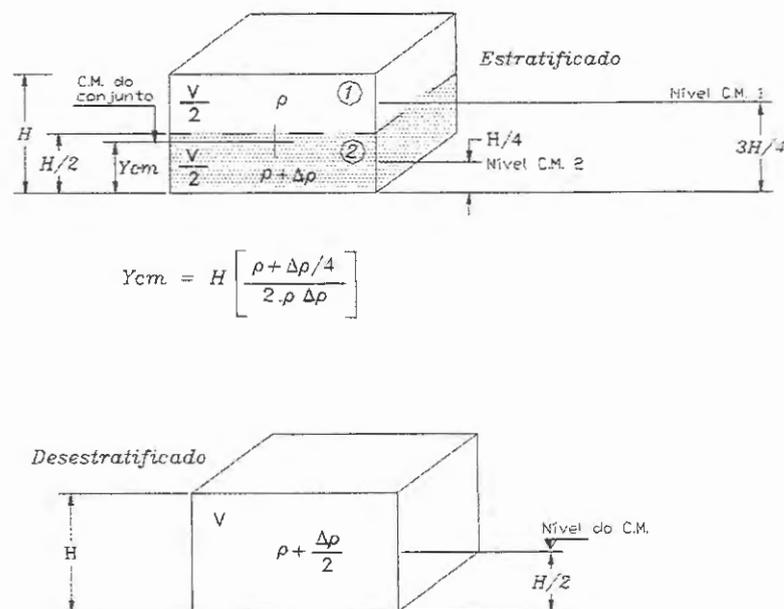


FIGURA 3.13: Variação entre os centros de massa de um volume d'água estratificado e um volume desestratificado.

Fonte: Adaptado de PORTO (1991)

Portanto, para desestratificar um volume líquido, é necessário elevar o centro de massa, introduzindo energia ou retirando-a da superfície, provocando a inversão térmica.

Essa energia necessária para provocar a mistura vem de fontes como vento, vazões de entrada e saída, equipamentos mecânicos, etc.

3.5.1 - Fontes de energia para mistura

Conforme mencionado anteriormente, as principais fontes de energia para a mistura de lagoas de estabilização são a troca de energia térmica pela interface ar-água, vento, vazões de entrada e saída e, ocasionalmente, o emprego de equipamentos mecânicos.

3.5.1.1 - Trocas de energia térmica

A troca de energia térmica pela superfície da lagoa afeta o regime de mistura de duas maneiras: a primeira pelo aumento ou diminuição da temperatura, alterando a densidade da água e conseqüentemente a energia potencial da lagoa e, a segunda, provocando a mistura convectiva durante o resfriamento das camadas superficiais.

3.5.1.2 - Ação do vento

O vento é uma importante fonte de energia para as lagoas de estabilização. Além de promover a mistura do volume líquido, seja pelo atrito na superfície da lagoa, ou pelas correntes por ele provocadas, o vento auxilia nas trocas gasosas na interface ar-água; além disso, o vento afeta diretamente a perda de energia térmica por evaporação em um corpo d'água.

A formação de ondas superficiais gera uma turbulência que se propaga para baixo, como um processo convectivo. Dessa maneira, parte da energia cinética do vento é convertida em turbulência.

A magnitude da turbulência deve ser função da velocidade do vento, gradiente de densidade do líquido, da área superficial da lagoa, da profundidade e da existência de barreiras físicas ao redor da lagoa.

3.5.1.3 - Vazão de entrada

A diferença de temperatura entre o esgoto afluyente e a massa líquida influi decisivamente na distribuição da carga. Se a temperatura do afluyente é maior que a da água da lagoa, o esgoto tende a espalhar-se sobre a superfície da lagoa. Ao contrário, se o afluyente for mais frio que o líquido da lagoa, o esgoto penetra no fundo da lagoa (KAMIYAMA, 1989). Assim, quando o afluyente entra na lagoa, o esgoto acomoda-se na camada cuja densidade for similar à sua. Esse processo é governado pela temperatura do afluyente e pela concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão.

Segundo GU et al. (1996), o afluyente causa alguma turbulência provocando a mistura da coluna líquida, cuja magnitude depende de como se evidencia sua introdução na lagoa (emergindo, submergindo, espalhando-se, etc.).

Para haver mistura, é necessário que haja energia e a transferência dessa energia também depende da vazão de entrada; assim, quanto maior a vazão afluyente, mais efetiva será a mistura por ela provocada.

3.5.1.4 - Vazão de saída

As vazões de saída geram correntes de circulação que contribuem para alteração do regime de mistura do volume líquido proporcionado pela turbulência gerada. A zona afetada por essas correntes, dependem principalmente da posição das saídas, da vazão efluente e da estabilidade da estratificação.

TORRES et al. (1997) observaram em uma lagoa facultativa que, durante o verão, período em que ocorreu a estratificação térmica, a zona ativa estendeu-se da superfície até a profundidade onde situava-se a tubulação de saída.

3.5.1.5 - Equipamentos mecânicos

Na literatura vários são os casos apresentados com emprego de equipamentos mecânicos, como bombas submersíveis, com o objetivo de manter o volume líquido desestratificado termicamente.

SILVA (1982) instalou bombas submersas no centro de lagoas facultativas e a 30 cm acima do fundo, recalçando o líquido a 5 cm abaixo da superfície líquida, a fim de manter

todo o volume líquido misturado. A densidade de potência instalada nessas lagoas variou de $0,78 \text{ W/m}^3$ a $1,78 \text{ W/m}^3$. MARAIS¹⁶ apud SILVA (1982) utilizou densidade de potência bem menor ($0,04 \text{ W/m}^3$) em pesquisa realizada na cidade do Cabo, África do Sul.

A densidade de potência a ser instalada em uma lagoa para que promova a desestratificação térmica depende de um conjunto de vários fatores, o que dificulta a fixação de uma taxa única.

3.5.2 - Processos de transporte de energia e massa

Segundo HARLEMAN (1975), na maioria dos problemas ambientais em que se observa a distribuição de poluentes em corpos d'água, o transporte de massa pode ser representado pela *advecção* e *difusão*. No caso da energia térmica há ainda um terceiro mecanismo de transferência de energia: a *irradiação*, ou *radiação*.

- *Advecção* é o nome dado ao processo de transporte relativo ao campo de velocidades do meio fluido, ou seja, se o fluido possui velocidade U , então o transporte advectivo se dará na mesma direção e com intensidade $U \cdot C_e$, onde C_e é a concentração do elemento transportado. Nas lagoas de estabilização a advecção é determinada pelas vazões de entrada e saída e pelo atrito do vento na superfície líquida. O fluxo de massa ou energia transportado pela advecção é determinado pela equação:

$$q_x = U \cdot C_e \quad (3.25)$$

sendo q_x o fluxo de energia ou massa transportado na direção x ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); U a velocidade do fluido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) e, C_e a concentração do elemento transportado ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

- *Difusão* é o nome dado ao mecanismo de transferência quando o elemento é transportado devido a movimentos aleatórios das partículas no sentido decrescente da concentração deste elemento. Esse mecanismo é subdividido em difusão molecular e difusão turbulenta. Na *difusão molecular* as partículas são

¹⁶ MARAIS, G.v.r. (1970) Overloading of Oxidation Ponds. *Conference of the Institution of Municipal Engineers of Southern Africa*, Salisbury.

moléculas e, a propriedade se transfere devido à agitação molecular; na *difusão turbulenta* as partículas são volumes macroscópicos do fluido, os quais percorrem aleatoriamente grandes distâncias. O mecanismo da difusão pode ser representado pela equação:

$$q = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.26)$$

onde q é o fluxo de energia ou massa transportado pela difusão ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}$); D é o coeficiente de difusão na direção x , o qual engloba a difusão molecular e turbulenta ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$); $\frac{\partial C}{\partial x}$ é o gradiente de concentração de um determinado elemento na direção x ($\text{kg.m}^{-3}.\text{m}^{-1}$).

- *Radiação*: A propriedade é transferida sem necessitar de um meio preenchido de matéria, através de ondas eletromagnéticas. Nas lagoas de estabilização, a irradiação térmica do Sol é um dos principais fatores do aquecimento superficial da água.

De acordo com HARLEMAN (1975), o termo *advecção* é usado principalmente para representar o movimento horizontal da massa líquida tendo a água como meio. Daí, surge então o termo *convecção* usado principalmente quando o movimento da massa líquida ocorre na vertical, como por exemplo, devido a um diferencial de aquecimento da massa líquida. Dessa maneira tem-se:

- *Convecção* é o nome dado ao processo induzido pela tendência de flutuação que ocorre sempre que o perfil de densidade altera-se tornando instável.

Da associação dos mecanismos de *advecção* e *difusão* surge o termo *dispersão* que representa um termo de mistura que envolve uma redistribuição do material por turbilhonamento.

- *Dispersão*.

Uma vez que o perfil de velocidade do fluido é afetado pelo atrito, ocorre um espalhamento das partículas induzidas pelo gradiente de velocidade. A dispersão é o efeito combinado da mistura causada pelo perfil de velocidade e pela difusão.

3.6 - Indicadores da estratificação térmica

Neste item são apresentados alguns indicadores da ocorrência da estratificação térmica. O adimensional criado pela Water Resources Engineers, Inc. foi estabelecido para grandes reservatórios, embora VANZO (1990) tenha empregado para lagoas de estabilização; já o proposto por Watanabe foi desenvolvido baseado em lagoas de resfriamento, sendo porém utilizado por PORTO (1991) para avaliação do potencial de ocorrência de estratificação térmica no reservatório de Jacareí, pertencente ao sistema Cantareira e, por fim, o indicador proposto por DAVIDSON et al. (1994) cujo modelo compara o perfil térmico de um tanque qualquer ao perfil térmico teórico formado sob a condição de mistura completa e escoamento tubular.

3.6.1 - Critério proposto pela Water Resources Engineers, Inc.

A Water Resources Engineers, Inc. apud ORLOB (1983) desenvolveu um critério baseado no número de Froude densimétrico, F_D , aplicado inicialmente a lagos naturais. O índice criado, compara a força inercial, representada pela velocidade média afluyente, com a força gravitacional, que tende a manter a estabilidade densimétrica, conforme mostrado na seguinte equação:

$$F_D = \frac{U}{\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o} \right) \cdot g \cdot H \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.27)$$

onde U é a velocidade média do líquido dentro do lago ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); H é a profundidade média (m); $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre a camada líquida do fundo e a camada superficial ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); ρ_o é a densidade de referência considerada como sendo aquela referente à camada superficial ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); e g é a aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$).

Se o comprimento e o volume da lagoa são introduzidos como parâmetros característicos da eq. (3.27) tem-se $U = \frac{Q}{W \cdot H}$, e $U = L \cdot W \cdot H$, sendo Q a vazão afluyente

($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), W a largura da lagoa (m), e L o comprimento (m). Assim, pode-se escrever U como função de L , Q e V :

$$U = L \cdot \frac{Q}{V} \quad (3.28)$$

Substituindo a eq.(3.28) na eq.(3.27) e multiplicando o denominador por $\left(\frac{d}{d}\right)^{\frac{1}{2}}$,

obtem-se:

$$F_D = L \cdot \frac{Q}{V} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\frac{\Delta\rho}{H} \cdot g \cdot H^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

Fazendo $\beta = \frac{\Delta\rho}{H}$ e substituindo na eq.(3.29) resulta:

$$F_D = \frac{L}{H} \cdot \frac{Q}{V} \cdot \left(\frac{\rho_o}{\beta \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

De acordo com ORLOB (1983), para reservatórios bem estratificados tem-se¹⁷ $F_D < < \frac{1}{\pi}$. Reservatórios fracamente estratificados, são geralmente aqueles para os quais $0,1 < F_D < 1,0$; já para reservatórios totalmente misturados possuem $F_D > > 1,0$.

Segundo RUOCHUAN¹⁸ não há nenhum valor limite para o número de Froude, que possa indicar ou estimar a ocorrência da estratificação térmica em lagoas de estabilização; contudo, segundo o pesquisador, quando o número de Froude for extremamente alto, haverá mistura completa e destruição da estratificação.

¹⁷ ORLOB (1983) não explicou qual a relação entre o valor de $1/\pi$ e a condição de estratificação térmica.

¹⁸ RUOCHUAN, G. (1998). Information to USP-EESC. (informação pessoal). GU@cclab.iastate.edu ("There is no limit value of Froude number. However, if Fr is extremely high, it will cause complete mixing and destroy stratification.")

3.6.2 - Critério proposto por WATANABE.

JIRKA et al. (1979) e JIRKA et al. (1980) analisaram o fenômeno da estratificação térmica em lagoas de resfriamento, utilizando dados de campo e de laboratório. As lagoas de resfriamento são usadas para a dissipação do calor dos efluentes de estações termoeletricas.

JIRKA et al.¹⁹ apud JIRKA et al. (1980) mencionam que o carregamento térmico típico dessas lagoas varia de 0,5 MW/acre ($\approx 1,2$ MW/ha) a 2,2 MW/acre ($\approx 5,4$ MW/ha). Convertendo essas taxas de carregamento térmico para $\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, encontra-se valores de 24800 a 111600, respectivamente, sendo aproximadamente 100 vezes superior a magnitude da radiação solar incidente nas lagoas de estabilização.

Segundo JIRKA et al. (1979) e JIRKA et al. (1980), Watanabe propôs, em um artigo não publicado, um adimensional denominado *pond P*, a ser empregado para definir o grau de estratificação vertical nas lagoas de resfriamento (eq.3.31),

$$P = \left(\frac{f_i}{4} \cdot \frac{Q_o^2}{\beta \cdot \Delta T_o \cdot g \cdot H^3 \cdot W^2} \cdot D_v^3 \cdot \frac{L}{H} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.31)$$

no qual f_i é o fator de atrito interfacial (0,01 adimensional, PORTO, 1991), Q_o é a vazão afluente ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$); ΔT_o é a diferença de temperatura entre a vazão afluente e o valor médio no lago ($^{\circ}\text{C}$); $\beta = -\left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}\right)$ é o coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$); g é a aceleração da gravidade ($\text{m}.\text{s}^{-2}$); H é a profundidade média da lagoa (m); D_v é a razão de diluição para a vazão de entrada (adimensional); L é o comprimento da lagoa (m), e W é a largura (m).

Segundo JIRKA et al. (1979), se $P \leq 0,3$ a lagoa estará bem estratificada, se $0,3 \leq P \leq 1,0$ a lagoa estará parcialmente estratificada, e se $P \geq 1,0$ a lagoa estará verticalmente misturada.

¹⁹ JIRKA, G.H.; CERCO, C.F.; HARLEMAN, D.R.F. (1978). *Mathematical Predictive Models for Cooling Lakes and Ponds. Part A: Model Development and Design Considerations*. Technical Report N.238, R.M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

3.6.3 - Critério proposto por DAVIDSON et al. (1994).

DAVIDSON et al. (1994) propuseram um novo índice para quantificar a mistura em tanques de armazenamento de água, baseando-se no conceito de “*momento de energia*”, calculado a partir do perfil de temperatura. Os valores máximos e mínimos para este momento de energia são determinados teoricamente assumindo perfeita estratificação e mistura completa, respectivamente. O novo índice, denominado MIX, tem o valor de 1,0 para tanques completamente misturados e zero para tanques bem estratificados.

Segundo DAVIDSON et al. (1994) o momento de energia é similar ao momento de massa M , usado na mecânica dos sólidos, sendo aqui introduzido para considerar a posição de um elemento de volume de controle com uma determinada energia E . O momento de massa mede a tendência de distribuição da massa ao redor de uma linha imaginária distanciada de x (eq.3.32).

$$M = \int_0^L x \cdot dM \quad (3.32)$$

Pela substituição da massa pela energia armazenada, e a coordenada horizontal x pela coordenada vertical y , o momento de energia em um tanque de armazenamento de energia solar, com profundidade H , é definido pela eq.(3.33):

$$M_E = \int_0^H y \cdot dE \quad (3.33)$$

DAVIDSON et al. (1994) consideraram o modelo de escoamento tubular (*plug flow*) formado por diversos isotermas de fluido, para prever o perfil de temperatura do tanque e assim a energia contida em um tanque no qual nenhuma mistura ocorre. O perfil inicial de temperatura e as condições de vazão afluente devem ser previamente especificados.

Após ocorrer a perda térmica para a vizinhança, a temperatura do i -ésimo elemento do tanque estratificados é dado pela solução analítica da equação:

$$\rho_i \cdot c_{p_i} \cdot V_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = -UA_{T_i} \cdot (T_i - T_a) \quad (3.34)$$

onde o i -ésimo elemento é composto por ρ_i , a densidade da água (kg.m^{-3}); c_{pi} , o calor específico da água ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); V_i , o volume do elemento (m^3); UA_{Ti} , o coeficiente global de transferência de calor (W.K^{-1}); T_i , a temperatura do elemento (K); T_a , a temperatura do ambiente (K).

Por outro lado, DAVIDSON et al. (1994) consideraram que o perfil de temperatura de um tanque totalmente misturado é determinado considerando que a água que entra no tanque é completamente misturada ao volume deste. Para este caso, o balanço de energia para cada instante é expresso por:

$$\rho_T \cdot c_{pT} \cdot V_T \cdot \frac{dT_T}{dt} = \dot{m}_{in} \cdot c_{pin} \cdot (T_{in} - T_T) - UA_T \cdot (T_i - T_a) \quad (3.35)$$

sendo \dot{m}_{in} o fluxo de massa afluente (kg.s^{-1}), e T_{in} a temperatura do afluente (K).

Uma vez determinados os perfis teóricos de temperatura em um tanque não misturado e em outro totalmente misturado, os momentos de energia para a condição de não-mistura ou totalmente estratificado (M_{str}), e totalmente misturado (M_{mix}) são incorporados ao número MIX , representado pela equação:

$$MIX = \frac{(M_{STR} - M_{REAL})}{(M_{STR} - M_{MIX})} \quad (3.36)$$

Assim, para um dado conjunto de condições, M_{str} e M_{mix} representam os maiores e os menores valores do momento de energia, respectivamente. O número MIX igual a zero para um tanque real, com a energia distribuída igualmente a um tanque totalmente estratificado; por outro lado, se um tanque real tem um momento de energia igual aquele previsto pelo modelo do tanque totalmente misturado, o número MIX é igual a 1,0.

4 MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA E DO VOLUME ÚTIL

Antes da apresentação da formulação matemática do modelo de estratificação é conveniente que ao leitor sejam apresentados alguns aspectos gerais relacionados ao projeto hidráulico de lagoas de estabilização que irão influir nas hipóteses de trabalho empregadas no equacionamento. Apresenta-se também, inicialmente, o conceito de volume útil e o modelo físico de uma lagoa estratificada.

Normalmente, o posicionamento das tubulações de entrada das lagoas facultativas e de maturação encontram-se junto à superfície líquida ou junto ao fundo (ver FIGURA 4.1, caso 1 e 2 respectivamente). KELLNER & PIRES (1998) sugerem que a tubulação de entrada localize-se próxima ao fundo para melhorar o contato entre a matéria orgânica e a biomassa presente no lodo.

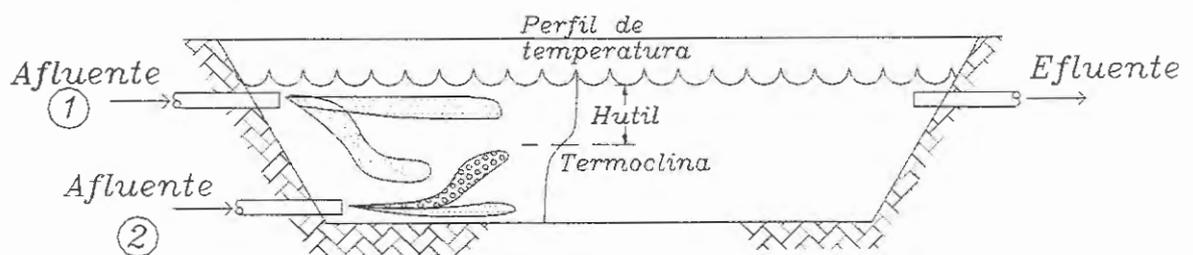


FIGURA 4.1: Escoamento afluente em uma lagoa de estabilização

Nota:

-  Afluente com a mesma densidade da camada onde é depositado
-  Afluente com densidade maior do que a camada onde é depositado
-  Afluente com densidade menor do que a camada onde é depositado

Há vários tipos de dispositivos para retirada do efluente de uma lagoa de estabilização, porém estes o fazem sempre pela superfície. Conforme explicado na seção 3.2,

do ponto de vista sanitário, o efluente retirado da região próxima à superfície apresenta melhor qualidade de que os efluentes retirados de regiões mais profundas de uma lagoa de estabilização.

O afluente, ao entrar na lagoa, acomoda-se em uma determinada profundidade cuja densidade da água da lagoa seja igual à densidade do afluente, conforme apresentado na seção 3.5.1.3. Ao estabelecer-se em uma determinada camada, o líquido afluente “empurra” a camada imediatamente superior em direção à superfície, criando assim uma corrente vertical de mesma magnitude que a vazão afluente, FIGURA 4.1.

Dependendo das trocas de energia entre a lagoa e o meio, o perfil vertical de temperatura vai tomando forma, desviando-se de um perfil uniforme, ocorrendo, então, a estratificação térmica e o conseqüente perfil de densidade.

Quando um corpo líquido está termicamente estratificado formam-se duas regiões distintas: o *epilimnio*, nome dado à camada junto à superfície líquida, com temperatura mais alta e, conseqüentemente, com menor densidade; e o *hipolimnio*, camada próxima ao fundo da lagoa, com temperatura mais baixa e, conseqüentemente mais densa.

A diferença de densidade existente entre essas duas camadas prejudica o fluxo de massa na lagoa. Sendo assim o volume ocupado pelo *hipolimnio* torna-se uma zona morta diminuindo o volume que efetivamente promove a depuração dos esgotos. Dessa maneira, define-se *volume útil* da lagoa de estabilização o volume compreendido entre a termoclina e a superfície líquida.

No caso de não ocorrer a estratificação térmica, o perfil de temperatura adquire a forma de linha vertical e, nesse caso, o *volume útil* da lagoa passa a ser aquele volume compreendido entre o fundo da lagoa e a superfície líquida.

Tendo em conta os fenômenos de estratificação, FERRARA & HARLEMAN (1982) revelaram que o fluxo dentro da lagoa é dividido, basicamente, em duas partes denominadas zona ativa e zona de retorno ou zona morta. Segundo esses pesquisadores o tempo de detenção real do esgoto na lagoa depende do volume que a zona ativa ocupa dentro da lagoa, que normalmente é bem inferior ao volume total teórico. Alguns anos mais tarde, PREUL & WAGNER (1987) sugeriram a inclusão de um fator redutor do volume ativo devido a ocorrência da estratificação térmica. Observa-se, então, que é necessário um procedimento matemático para previsão e quantificação do fenômeno da estratificação térmica.

O modelo matemático aqui apresentado foi desenvolvido a partir dos trabalhos de NORTON & KING (1974), FRITZ et al. (1980) e WATER RESOURCES ENGINEERS,

Inc²⁰. apud ORLOB (1983), para determinação do perfil de temperatura em lagos e reservatórios.

O modelo térmico unidimensional de múltiplas camadas desenvolvido neste trabalho, permite a determinação do perfil de temperatura em uma lagoa de estabilização, assim como do seu volume útil.

O modelo foi conceituado como uma sobreposição de camadas com a mesma espessura, onde cada elemento do volume de controle é capaz de receber ou perder fluxos advectivos (afluente e efluente) preservando o balanço de massa. O calor passa pelos planos-limites horizontais de cada elemento pela advecção e pela difusão; já a introdução da energia térmica pela insolação depende da profundidade em que o elemento de controle se encontra.

A energia térmica é transferida de um elemento para outro quase que exclusivamente pela advecção e, uma pequena parcela, pela difusão.

A introdução do afluente ocorre de acordo com o critério da densidade, ou seja, o afluente movimenta-se até que ocorra um equilíbrio entre as densidades do afluente e do líquido compreendido por um determinado elemento de controle da lagoa, uma vez que já foi demonstrado que a densidade do afluente é o principal fator que influi na posição que o afluente irá tomar após deixar a tubulação de entrada. Observa-se que normalmente as velocidades de entrada são baixas para provocar correntes de jato intensas na lagoa.

O efluente e, conseqüentemente parte da energia térmica contida na lagoa, é retirado de um determinado elemento do volume de controle, o qual é estabelecido de acordo com a profundidade da tubulação de saída.

A FIGURA 4.2 mostra graficamente o modelo físico da lagoa de estabilização, empregada no modelo unidimensional de múltiplas camadas.

²⁰ WATER RESOURCES ENGINEERS, Inc. (1969). *Mathematical models for prediction of thermal energy changes in impoundments.* U.S. Environmental Protection Agency Water Pollution Research Series 16130 EXT, Contract 14-22-422. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 157 pp.

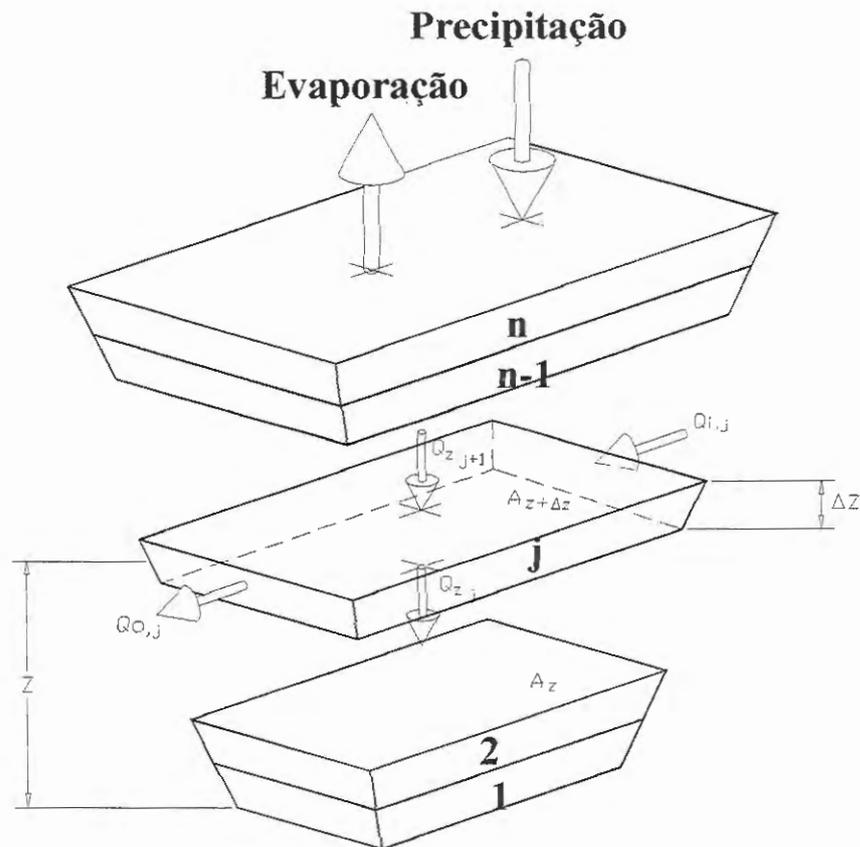


FIGURA 4.2: Representação conceitual da lagoa estratificada

As hipóteses consideradas no desenvolvimento do modelo unidimensional de múltiplas camadas são:

1. as isotermas são paralelas à superfície líquida;
2. as camadas definidas pelas isotermas são completamente misturadas e homogêneas;
3. a transferência de calor interno na lagoa ocorre apenas na direção vertical;
4. não existe troca de calor entre a água e as paredes e o fundo da lagoa;
5. a advecção oriunda do movimento de entrada e saída do líquido ocorre uniformemente em cada elemento do volume de controle;
6. a dispersão interna de calor é calculada por um mecanismo que combina os efeitos da difusão molecular, difusão turbulenta e convecção.

Como a lagoa é representada por uma sucessão de camadas superpostas (ver FIGURA 4.2), pode-se representar os diversos processos de transferência de calor em um determinado elemento como mostrado na FIGURA 4.3.

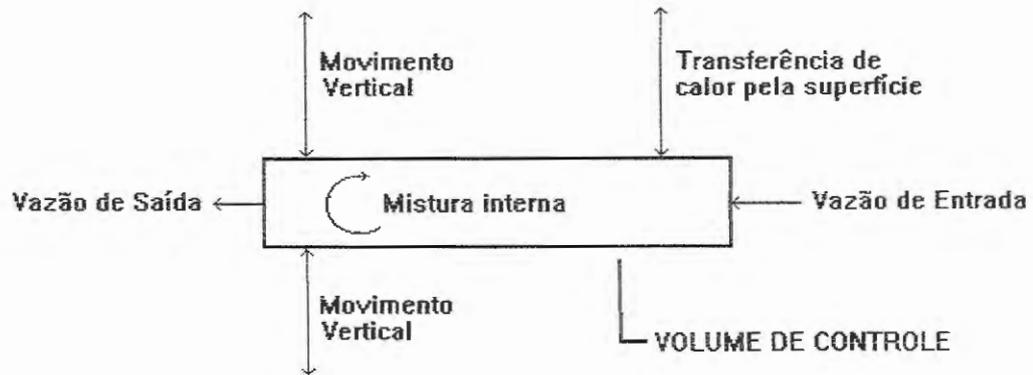


FIGURA 4.3: Transferência de calor e massa em um elemento do volume de controle

4.1 - Formulação para cálculo do perfil de temperatura

A determinação do perfil vertical de temperatura, empregando o modelo unidimensional de múltiplas camadas, para uma lagoa de estabilização assim como para qualquer outro reservatório, consiste basicamente na solução de duas equações diferenciais ordinárias que representam os balanços de massa e de energia térmica.

4.1.1 - Balanço de massa

O balanço de massa para um elemento de volume \bar{V}_j da lagoa é expresso pela equação:

$$\frac{\partial \bar{V}_j}{\partial t} = Q_{z_{j+1}} - Q_{z_j} + Q_{i_j} - Q_{o_j} \quad (4.1)$$

sendo $\bar{V}_j = \frac{1}{2} \cdot (A_z + A_{z+\Delta z}) \cdot \Delta z$ é o volume do j -ésimo elemento (m^3); $A_z, A_{z+\Delta z}$ são as áreas horizontais dos planos limítrofes do elemento considerado (m^2); Δz é a espessura do elemento (m); z é a profundidade, medida a partir do fundo (m); j é o elemento de indexação, com $j=1$ para o elemento do fundo; Q_z é a "vazão vertical" ($m^3 \cdot s^{-1}$); Q_i é a vazão afluyente, introduzida horizontalmente no j -ésimo elemento ($m^3 \cdot s^{-1}$); Q_o é a vazão

efluente, retirada do volume de controle ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); $\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = 0$ para todos os elementos²¹. Dessa maneira, aplicando-se a equação da continuidade para uma camada j qualquer, tem-se:

$$Q_{i,j} - Q_{o,j} = Q_{z,j} - Q_{z,j+1} \quad (4.2)$$

sendo $Q_{z,j}$ a vazão através da interface entre as camadas j e $j-1$ e, $Q_{z,j+1}$ a vazão através da interface entre as camadas j e $j+1$.

A “vazão vertical” Q_z é formada pelas correntes advectiva e/ou de densidade existentes dentro da lagoa.

Para as condições de entrada e saída apresentadas na FIGURA 4.2, são conhecidas as vazões afluente e efluente. As vazões nas interfaces entre camadas consecutivas ($Q_{z,j}$), para as quais a densidade do líquido da lagoa (ρ_i) é maior que a densidade do afluente (ρ_j), são determinadas pelas equações:

$$Q_{z,j} = 0 \text{ para } i \leq j \quad (4.3)$$

$$Q_{z,j+1} = \begin{cases} Q_{z,j} & \text{para } j > i \\ Q_{i,j} & \text{para } j = i \end{cases} \quad (4.4)$$

É importante lembrar, quando $\rho_{\text{afluente}} < \rho_j$ o afluente emerge, fazendo com que $Q_{z,j+1}$ seja a componente de saída da vazão vertical e $Q_{z,j}$ a componente de entrada, situação oposta àquela representada pela FIGURA 4.2; já quando $\rho_{\text{afluente}} > \rho_j$ o afluente submerge fazendo com que $Q_{z,j+1}$ seja a componente de entrada da vazão vertical e $Q_{z,j}$ a componente de saída para um determinado elemento, conforme representado na FIGURA 4.2.

Ao ocorrer a acomodação da vazão afluente em uma determinada camada i , estabelece-se a corrente advectiva entre esta e a camada de referência do dispositivo de saída. Assim, quando a camada de acomodação do afluente estiver abaixo da camada de localização do dispositivo de saída, o líquido da lagoa emerge fazendo com que $Q_{z,j+1}$ seja a componente de saída da vazão vertical e $Q_{z,j}$ a componente de entrada, situação oposta àquela representada pela FIGURA 4.2; já quando a camada de acomodação localiza-se acima da camada de localização do dispositivo de saída o líquido da lagoa submerge fazendo com

²¹ O volume de todos os elementos é fixo. No caso do elemento da superfície, o efluente é retirado por vertedores que mantém a altura praticamente constante, sendo desprezível a variação temporal do volume, a menos durante a ocorrência de chuvas torrenciais.

que $Q_{z_{j+1}}$ seja a componente de entrada da vazão vertical e Q_{z_j} a componente de saída para um determinado elemento, conforme representado na FIGURA 4.2.

4.1.2 - Balanço da energia térmica

O balanço da energia térmica no elemento de volume \bar{V}_j é expressa por:

$$\frac{\partial H_j}{\partial t} = (h_i - h_o + h_{sz}) - (h_{w_j} - h_{w_{j+1}}) - (h_{d_j} - h_{d_{j+1}}) \quad (4.5)$$

sendo que $H_j = c \cdot \rho \cdot \bar{V}_j \cdot T_j$ é a energia térmica contida no j -ésimo elemento (J); c é o calor específico da água ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); ρ a densidade da água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); T_j a temperatura do j -ésimo elemento ($^\circ\text{C}$); $h_i = c \cdot \rho \cdot Q_i \cdot T_i$ a energia térmica introduzida pela vazão afluenta ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$); $h_o = c \cdot \rho \cdot Q_o \cdot T_j$ a energia térmica retirada pela vazão efluente ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$); $h_{sz} = q_{sz} \cdot A_z$ a energia térmica introduzida pela insolação direta ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$); $q_{sz} = (1 - \gamma) \cdot q_{s_n} \cdot e^{-kz}$ o fluxo de radiação solar para profundidade z ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); q_{s_n} o fluxo de radiação solar líquida que penetra na superfície ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); γ a taxa de radiação absorvida na superfície líquida; k o coeficiente de atenuação da luz solar (m^{-1}); $h_{d_j} = c \cdot \rho \cdot E_z \cdot A_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$ quantidade de calor transmitido por difusão ao longo do eixo vertical ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$); $h_{w_j} = c \cdot \rho \cdot Q_j \cdot T_j$ a energia térmica advectada ao longo do eixo vertical ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$), e E_z o coeficiente de difusão vertical ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) que compreende a difusão molecular e a difusão turbulenta.

Segundo o HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER²² apud ORLOB (1983), os mecanismos de difusão e dispersão são denominados “difusão efetiva” por considerar que a combinação de seus efeitos na transferência de calor é análoga ao processo randômico de difusão molecular. Neste trabalho, porém, denominou-se a “difusão efetiva” (E_z) de difusão vertical.

Segundo ORLOB (1983) a magnitude do coeficiente E_z varia amplamente, tanto no tempo quanto no espaço, dependendo das circunstâncias físicas do corpo d’água a ser representado pelo modelo unidimensional de múltiplas camadas.

²² HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (1974). WQRRS, generalized computer program for river-reservoir systems. US Army Corps of Engineers, HEC, Davis, CA User’s Manual 401-100,100A, 210pp.

Em experimentos realizados em laboratório, na ausência de turbulência, E_z deve aproximar-se dos níveis mínimos compreendidos na faixa de 10^{-6} a 10^{-8} $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto que em lagos e reservatórios de maior tamanho esses valores podem estar na faixa de 10^{-4} a 10^{-2} $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (WATER RESOURCES ENGINEERS, Inc²³ apud ORLOB, 1983).

Segundo ORLOB & SELNA²⁴, WATER RESOURCES ENGINEERS, Inc e ORLOB & SELNA²⁵ apud ORLOB (1983) e CHAPRA (1997), a análise dos perfis de temperatura de lagos e reservatórios mostraram que E_z varia amplamente com a profundidade, sendo que os valores mínimos ocorrem na região da termoclina e próximo ao fundo; já os valores mais altos, ocorrem no epilímnio e estão claramente relacionados à mistura induzida pelo atrito do vento na superfície líquida.

4.1.3 - Energia térmica armazenada por um elemento de controle

A partir da substituição das expressões dos fluxos na a eq. (4.5) tem-se a energia térmica armazenada em um elemento de controle, com volume \bar{V}_j e temperatura T_j , conforme representado pela equação:

$$\frac{\partial(\bar{V}_j \cdot T_j)}{\partial t} = \underbrace{(Q_{i_j} \cdot T_{i_j} - Q_o \cdot T_j)}_{\text{adveção local}} + \underbrace{\left(\frac{1}{c \cdot \rho} \cdot q_{sz} \cdot A_z\right)}_{\text{radiação solar}} - \underbrace{(Q_{z_j} \cdot T_j - Q_{z_{j+1}} \cdot T_{j+1})}_{\text{adveção vertical}} - \underbrace{\left(E_j \cdot A_j \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right|_j - E_{j+1} \cdot A_{j+1} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right|_{j+1}}_{\text{difusão vertical}} \quad (4.6)$$

²³ WATER RESOURCES ENGINEERS, Inc (1968). Prediction of thermal energy distribution in streams and reservoirs. *Report to California Department of Fish and Game*, 90 pp.

²⁴ ORLOB, G.T.; SELNA, L. (1967). Prediction of thermal energy distributions in deep reservoirs Proceedings of 6th Annual Sanitation and Water Resources Engineering Conference, Vanderbilt University, Nashville, TN, pp.64-77.

²⁵ ORLOB, G.T.; SELNA, L. (1970). Temperature variations in deep reservoirs. Proceedings of American Society of Civil Engineers, *Journal of Hydraulics Division* 96(HY2), paper 7063.

4.1.4 – Cálculo do Perfil de Temperatura

O primeiro passo para o cálculo numérico do perfil de temperatura, refere-se à discretização das equações diferenciais $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)$ que aparecem na eq. (4.6).

Para a solução da equação diferencial ordinária (EDO) $\frac{\partial T}{\partial z}$, aplicou-se o método das diferenças finitas, sendo empregado o esquema regressivo, conforme mostrado pela equação (4.7).

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{\Delta T}{\Delta Z} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta Z} \quad (4.7)$$

O modelo proposto por NORTON & KING (1974) e ORLOB (1983), pressupõe a existência de um perfil térmico para o início dos cálculos (ver seção 4.1.5), mostrando então que se trata de um *Problema de Valor Inicial* (PVI).

Substituindo a equação (4.7) na equação (4.6) e fazendo $\frac{\partial \bar{V}_j}{\partial \alpha} = \dot{V}_j$ e $\frac{\partial T_j}{\partial \alpha} = \dot{T}_j$ tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{V}_j \cdot \dot{T}_j + T_j \cdot \dot{V}_j = & Q_{i_j} \cdot T_{i_j} - Q_{o_j} \cdot T_j + \frac{q_{s_z} \cdot A_z}{c \cdot \rho} - Q_{z_j} \cdot T_j + Q_{z_{j+1}} \cdot T_{j+1} \\ & - \left[\left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \cdot T_j - \frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \cdot T_{j-1} \right) - \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \cdot T_{j+1} - \frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \cdot T_j \right) \right] \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_j \cdot \dot{T}_j = & -\dot{V}_j \cdot T_j + Q_{i_j} \cdot T_{i_j} - Q_{o_j} \cdot T_j + \frac{q_{s_z} \cdot A_z}{c \cdot \rho} - Q_{z_j} \cdot T_j + Q_{z_{j+1}} \cdot T_{j+1} - \frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \cdot T_j \\ & + \frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \cdot T_{j-1} + \frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \cdot T_{j+1} - \frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \cdot T_j \end{aligned} \quad (4.9)$$

Agrupando os termos em função de T tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{V}_j \cdot \dot{T}_j = & \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) \cdot T_{j-1} - \left[\dot{V}_j + Q_{o_j} + Q_{z_j} + \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_j + \\ & + \left[Q_{z_{j+1}} + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_{j+1} + \left(Q_{i_j} \cdot T_{i_j} + \frac{q_{s_z} \cdot A_z}{c \cdot \rho} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_j = & \left[\frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_{j-1} - \left[\frac{1}{V_j} \cdot (\dot{V}_j + Q_{o_j} + Q_{z_j}) + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_j + \\ & + \left[\frac{1}{V_j} \cdot Q_{z_{j+1}} + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_{j+1} + \frac{1}{V_j} \cdot \left(Q_{i_j} \cdot T_{i_j} + \frac{q_{s_z} \cdot A_j}{c \cdot \rho} \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

A equação (4.11) representa a equação diferencial $\frac{\partial T}{\partial t}$, discretizada implicitamente.

A aplicação da eq.(4.11) permite o cálculo de \dot{T}_j e, conseqüentemente de T_j , para todas as camadas $j=1, 2, \dots, i, \dots, n$ empregando qualquer um dos métodos numéricos apresentados nas seções 4.1.4.1 e 4.1.4.2.

A ferramenta matemática básica na definição de aproximações para as derivadas é a série de Taylor (CUNHA, 1993). Dessa maneira, o cálculo de $T_j^{t+\Delta t}$ pode ser efetuado empregando-se o Método de Runge-Kutta ou o método de Heun (Euler Modificado), como será visto adiante.

Se a estratificação da lagoa é estável, ou seja, $T_j \leq T_{j+1}$ os valores calculados devem satisfazer a estratificação, desde que os parâmetros do modelo tenham sido ajustados de forma que seja possível reproduzir as distribuições de temperatura observadas experimentalmente.

Caso a simulação numérica leve a um valor de $T_j > T_{j+1}$, os valores calculados deverão sofrer modificações a fim de considerar o processo de mistura entre as camadas. De acordo com RIGHETTO (1998) o fenômeno natural de mistura entre as camadas inicia-se nas camadas superiores, devido ao resfriamento da camada superior pela transferência de calor para a atmosfera.

Na simulação de distribuição da temperatura, a partir da verificação de que $T_j > T_k$, onde $k \geq j+1$, o processo de mistura (“virada convectiva”) entre as camadas j e k é considerado admitindo-se que as temperaturas corrigidas entre as camadas sejam iguais e expressas por:

$$T_j^{\text{corrigido}} = \dots = T_k^{\text{corrigido}} = \frac{\sum_{j=i}^k V_j \cdot T_j}{\sum_{j=i}^k V_j} \quad (4.12)$$

sendo T_j a temperatura e V_j o volume do elemento j .

Dessa maneira, repete-se a uniformização de temperatura das camadas superiores até que $T_j < T_k$, sendo $k \geq j + 1$.

4.1.4.1 – Método de Heun

Antes de apresentar o método de Heun, propriamente dito, é necessário voltar à equação (4.11):

$$\begin{aligned} \dot{T}_j = & \left[\frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_{j-1} - \left[\frac{1}{V_j} \cdot (\dot{V}_j + Q_{o,j} + Q_{z,j}) + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_j \\ & + \left[\frac{1}{V_j} \cdot Q_{z,j+1} + \frac{1}{V_j} \cdot \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \cdot T_{j+1} + \frac{1}{V_j} \cdot \left(Q_{i,j} \cdot T_{i,j} + \frac{q_{z,z} \cdot A_j}{c \cdot \rho} \right) \end{aligned}$$

que escrevendo-a na forma matricial, fica:

$$[I] \cdot \{\dot{T}\} = [S] \cdot \{T\} + \{P\} \quad (4.13)$$

onde $[I]$ é a matriz identidade, $[S]$ é uma matriz tridiagonal formada pelos elementos entre colchetes presentes na eq. (4.11) e, $\{P\}$ é um vetor com parâmetros conhecidos, referentes à entrada ou saída de energia térmica.

O método de Heun, também conhecido como método de Euler Modificado, fornece uma fórmula para o cálculo de $T_j^{t+\Delta t}$, considerando a média de \dot{T} para os tempos t e $t + \Delta t$, conforme mostrado pela equação (4.14). Para maiores detalhes, sugere-se a consulta à BOYCE & DIPRIMA (1988), que apresentam a dedução da equação de Heun.

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{(\dot{T}_j^t + \dot{T}_j^{t+\Delta t})}{2} \cdot \Delta t \quad (4.14)$$

onde Δt é o intervalo de tempo fixado para o cálculo, T_j^t é a temperatura do elemento j no tempo t , $T_j^{t+\Delta t}$ é a temperatura do elemento j no tempo $t + \Delta t$, \dot{T}_j^t é a derivada da



temperatura em relação ao tempo t para o elemento j e, $\dot{T}_j^{t+\Delta t}$ é a derivada da temperatura em relação ao tempo $t + \Delta t$ para o elemento j .

Conforme mencionado anteriormente, o modelo proposto por NORTON & KING (1974) e ORLOB (1983), pressupõe a existência de um perfil térmico para o início dos cálculos, ou seja, conhece-se de início T_j^t e sua derivada \dot{T}_j^t .

Voltando à equação (4.14), após reagrupar os termos em função do tempo t , obtém-se:

$$T_j^{t+\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \dot{T}_j^{t+\Delta t} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \dot{T}_j^t + T_j^t \quad (4.15)$$

onde T_j^t e sua derivada \dot{T}_j^t são conhecidas para o tempo t .

Dessa maneira, fazendo $b_j = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \dot{T}_j^t + T_j^t$ tem-se:

$$T_j^{t+\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \dot{T}_j^{t+\Delta t} + b_j^t \quad (4.16)$$

que escrita na forma matricial resulta:

$$\{T^{t+\Delta t}\} = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot \{\dot{T}^{t+\Delta t}\} + \{b^t\} \quad (4.17)$$

onde $\{b^t\}$ é o vetor cujos valores dependem da temperatura T e de sua derivada para o tempo t .

Substituindo a equação (4.17) na equação (4.13) resulta:

$$[I] \cdot \{\dot{T}^{t+\Delta t}\} = [S] \cdot \{b^t\} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot [S] \cdot \{\dot{T}^{t+\Delta t}\} + \{P\} \quad (4.18)$$

Fazendo $[S^*] = [I] - \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot [S]$ e $\{P^*\} = [S] \cdot \{b\} + \{P\}$ e, substituindo na equação (4.18), tem-se:

$$[S^*] \cdot \{\dot{T}^{t+\Delta t}\} = \{P^*\} \quad (4.19)$$

onde $[S^*]$ é uma matriz triangular formada pelos coeficientes entre colchetes da eq. (4.11).

Para resolução numérica da equação matricial (4.19), aplicou-se o método de eliminação de Gauss sem pivotamento.

Vale lembrar que existem dois casos importantes nos quais o método de eliminação pode ser aplicado sem pivotamento: matrizes diagonalmente dominantes e matrizes simétricas positivas (CUNHA, 1993).

a.) **Matriz Diagonalmente Dominante:** Diz-se que uma matriz é diagonalmente dominante quando

$$|a_{ii}| \geq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}|, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Os elementos da matriz $[S^*]$ são:

$$s_{i,i} = 1 + \frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left[\dot{V}_j + Q_{o_j} + Q_{z_j} + \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right],$$

$$s_{i,j+1} = -\frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left[Q_{z_{j+1}} + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \text{ e}$$

$$s_{i,j-1} = -\frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right)$$

A situação mais crítica ocorre para um termo $s_{i,i}$ tal que $i > 1$ e $i < n$. Quando isso ocorre vemos que $|s_{i,i}| > |s_{i,j-1}| + |s_{i,j+1}|$:

$$|s_{i,j-1}| + |s_{i,j+1}| = \left| -\frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) \right| + \left| -\frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left[Q_{z_j} + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \right|$$

$$\therefore |s_{i,j-1}| + |s_{i,j+1}| = \left| \frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left[Q_{z_j} + \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] \right|$$

Como $\dot{V}_j = 0$ para $i > 1$ resulta que

$$|s_{i,i}| = \left| 1 + \frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot \left[Q_{z_j} + \left(\frac{E_j \cdot A_j}{\Delta z} \right) + \left(\frac{E_{j+1} \cdot A_{j+1}}{\Delta z} \right) \right] + \frac{1}{2 \cdot \bar{V}_j} \cdot \Delta t \cdot Q_{o_j} \right|$$

Dessa maneira, tem-se $|s_{i,i}| > |s_{i,j-1}| + |s_{i,j+1}|$, provando que a matriz é diagonalmente dominante, o que torna possível a utilização do método de eliminação de Gauss sem pivotamento para a resolução do sistema apresentado na equação (4.19).

b.) **Matriz Simétrica Positiva:** Uma matriz é simétrica quando quando ela é igual à sua transposta ($A = A^T$) e, positiva quando os determinantes forem positivos ($\Delta_i > 0$).

A matriz $[S^*]$ de ordem n , possui três valores característicos a , b e c , estando assim sispostos:

$$[S^*] = \begin{bmatrix} a & b & 0 & 0 & \dots & 0 \\ c & a & b & 0 & & 0 \\ 0 & c & a & b & & 0 \\ 0 & 0 & c & a & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & \ddots & b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a \end{bmatrix} \quad [S^*]^T = \begin{bmatrix} a & c & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b & a & c & 0 & & 0 \\ 0 & b & a & c & & 0 \\ 0 & 0 & b & a & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b & \ddots & c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & a \end{bmatrix}$$

Logo, é possível observar que a matriz $[S^*]$ não é igual à sua matriz transposta $[S^*]^T$, não inviabilizando porém a resolução do sistema matricial apresentado na equação (4.19), já que a matriz $[S^*]$ mostrou ser diagonalmente dominante.

4.1.4.2 – Método de Runge-Kutta de 4ª ordem

Os métodos de Runge-Kutta são os mais populares dentre aqueles apropriados para os problemas de valor inicial, tendo como seus principais atrativos a simplicidade e alta precisão (CUNHA, 1993).

Voltando à eq.(4.11) e escrevendo-a como uma função de t e T , tem-se:

$$\dot{T}^t = f(t, T^t) \quad (4.20)$$

De acordo com BOYCE & DIPRIMA (1988) a fórmula de Runge-Kutta envolve uma média ponderada de valores de $f(t, T^t)$ tomados em pontos diferentes do intervalo $t_n < t < t_{n+\Delta t}$.

No desenvolvimento matemático do modelo unidimensional de múltiplas camadas, empregou-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem, cuja equação é dada por:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{6} \cdot (k_1 + 2 \cdot k_2 + 2 \cdot k_3 + k_4) \quad (4.21)$$

onde $k_{1,j} = f(t_n, T_j^t)$,

$$k_{2,j} = f\left(t_n + \frac{1}{2} \cdot \Delta t, T^t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot k_{1,j}\right),$$

$$k_{3,j} = f\left(t_n + \frac{1}{2} \cdot \Delta t, T^t + \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot k_{2,j}\right),$$

$$k_{4,j} = f\left(t_n + \frac{1}{2} \cdot \Delta t, T^t + \Delta t \cdot k_{3,j}\right)$$

Δt é o tamanho do passo (s), T_j^t é a temperatura (°C) do elemento j no tempo t .

É interessante observar que a soma $(k_{1,j} + 2 \cdot k_{2,j} + 2 \cdot k_{3,j} + k_{4,j})/6$ pode ser interpretada como um coeficiente angular médio da equação da reta descrita pela eq. (4.21).

4.1.5 - Procedimento de Cálculo do Perfil Zero

Conforme foi comentado na seção anterior (4.1.4) o modelo para cálculo do perfil de temperatura pode ser efetuado pelos métodos de Heun e de Runge-Kutta. Esses dois métodos numéricos são, por características próprias, dependentes do valor inicial, ou seja, para aplicação imediata de qualquer um dos métodos, é necessário o conhecimento do perfil vertical de temperatura, aqui denominado de *Perfil Zero*.

No entanto, ao iniciar a simulação numérica conhece-se apenas a temperatura média do afluente, a temperatura superficial da água, as energia térmicas que passam pela superfície líquida e as condições de contorno :

- $T_n = T_s$, para o elemento localizado na superfície líquida;
- $\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial T_2}{\partial t}$, para o elemento localizado junto ao fundo da lagoa²⁶.

sendo desconhecidos os valores da temperatura nos demais pontos ao longo da profundidade.

²⁶ Como há uma pequena troca de calor entre o líquido da lagoa e o fundo, considerou-se que a variação da temperatura na última camada é influenciada somente pela variação da temperatura em relação ao tempo da camada imediatamente superior à ela.

Dessa maneira, faz-se necessário determinar o perfil de temperatura para o tempo inicial ($t=0$) a fim de poder aplicar um dos métodos de cálculo apresentados.

Partindo da hipótese de que a formação o perfil vertical de temperatura depende das condições climáticas observadas no local, assim como da magnitude e das características térmica e quantitativa do afluente e das características físicas da lagoa em questão admitiu-se que, ainda que hipoteticamente, pudesse garantir a existência desse cenário, mantendo fixas as características anteriormente mencionadas durante todo o tempo necessário até que se definisse o perfil vertical de temperatura e este não sofresse mais nenhuma alteração.

Sendo assim, o método de convergência para determinação do perfil vertical de temperatura consiste em:

1. Adotar a temperatura média do afluente como sendo a temperatura do líquido na lagoa;
2. Fixar as características do afluente assim como as características climáticas referentes ao mês de janeiro (mês de início da simulação numérica);
3. Permitir a variação das horas do dia, assim como das energias térmicas dependentes do tempo;
4. Interromper as iterações numéricas assim que a diferença relativa entre o cálculo de dois perfis consecutivos de temperatura sejam inferiores a um determinado valor ε , conforme a equação (4.22).

$$\left| \frac{T_j^t - T_j^{t+\Delta t}}{T_j^{t+\Delta t}} \right|_{j=1 \dots n} \leq \varepsilon \quad (4.22)$$

sendo T_j^t a temperatura do elemento j no tempo t , $T_j^{t+\Delta t}$ a temperatura do elemento j no tempo $t + \Delta t$, e ε o erro relativo máximo permitido.

Os gráficos apresentados nas FIGURAS 4.4 e 4.5 permitem a visualização de vários perfis zero de temperatura, simulados²⁷ para as lagoas situadas em Campina Grande (PB) e Santa Fé do Sul (SP) respectivamente, variando-se apenas o máximo erro relativo permitido.

²⁷ Os valores admitidos para na entrada de dados para as simulações referentes às lagoas de Campina Grande (PB) e Santa Fé do Sul (SP), estão apresentadas no APÊNDICE I.

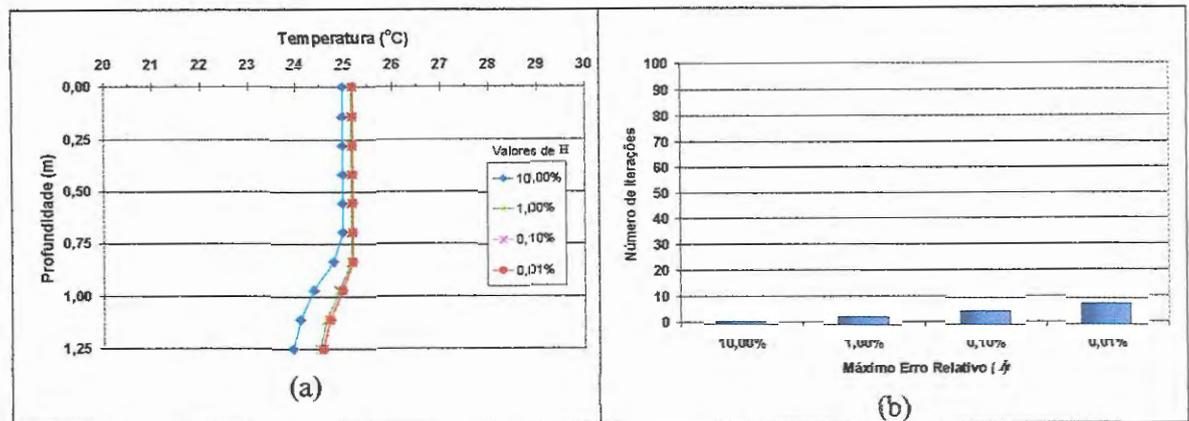


FIGURA 4.4: Resultados obtidos para o *Perfil Zero* em função do erro relativo máximo (ϵ) para a simulação de Campina Grande (PB)

NOTA: Resultados obtidos a partir da aplicação do Método de Heun com passo (Δt) de 0,5 hora

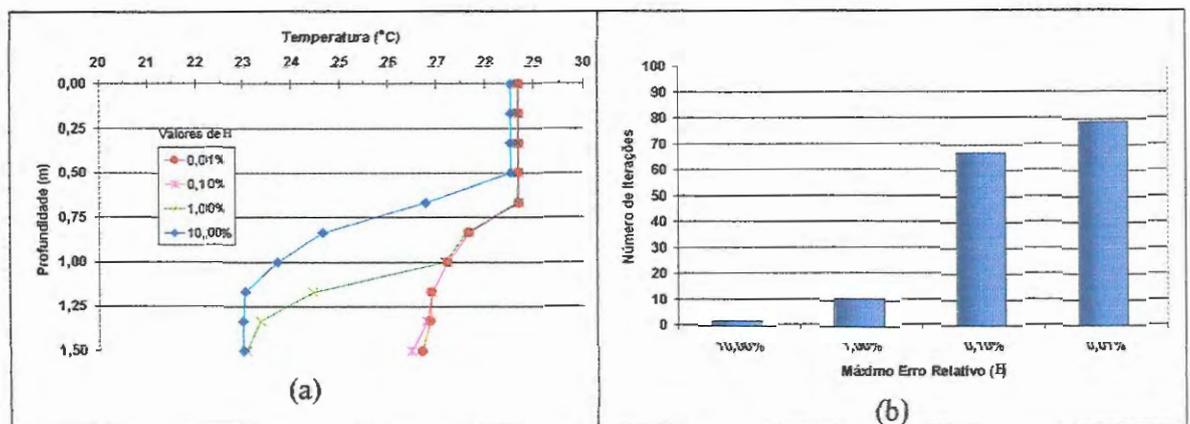


FIGURA 4.5: Resultados obtidos para o *Perfil Zero* em função do erro relativo máximo (ϵ) para a simulação de Santa Fé do Sul (SP)

NOTA: Resultados obtidos a partir da aplicação do Método de Heun com passo (Δt) de 0,5 hora

Como era de se esperar, a medida que diminui-se o erro máximo relativo (ϵ), aumenta-se a precisão e conseqüentemente o número de iterações necessárias para a determinação do *perfil zero* (ver FIGURAS 4.4 e 4.5).

O número de iterações necessárias para que ocorra a estabilização do *perfil zero* é tanto maior quanto mais acentuado for o fenômeno de estratificação térmica, como pode ser observado nas FIGURAS 4.4 e 4.5.

Para a simulação referente às condições de Campina Grande (PB), na qual verificou-se estratificação pouco acentuada, o erro relativo máximo da ordem de 1% foi suficiente para atingir a estabilidade do perfil térmico simulado; por outro lado, na simulação referente às condições de Santa Fé do Sul (SP), o erro máximo relativo de 1% não foi suficiente para garantir um bom ajuste o que, visualmente, foi conseguido com o erro máximo relativo da ordem de 0,1%.

Embora o modelo proposto para o cálculo do perfil de temperatura admita independência entre as condições climáticas de cada mês, o que não ocorre na realidade, é de se esperar que os perfis de temperatura da última hora do último dia do ano simulado (31/dez.) seja semelhante à primeira hora do primeiro dia do ano subsequente (1/jan.). Sendo assim, comparou-se os perfis da 24^a hora do dia 31 de dezembro com o perfil da 1^a hora do dia 1 de janeiro para as simulações referentes às condições de Campina Grande (PB) e Santa Fé do Sul (SP), conforme podem ser vistos nos gráficos apresentados nas FIGURAS 4.6 e 4.7.

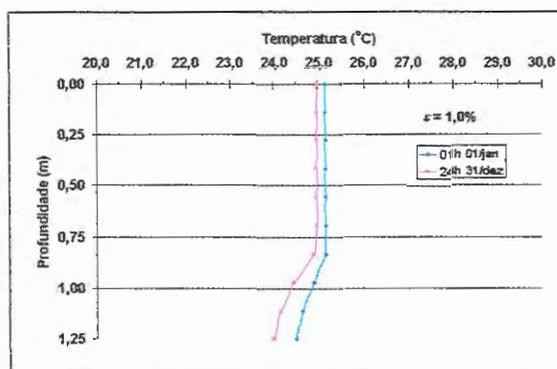


FIGURA 4.6: Comparação entre os perfis de temperatura de 1/jan com o perfil de 31/dez para a simulação de Campina Grande (PB)

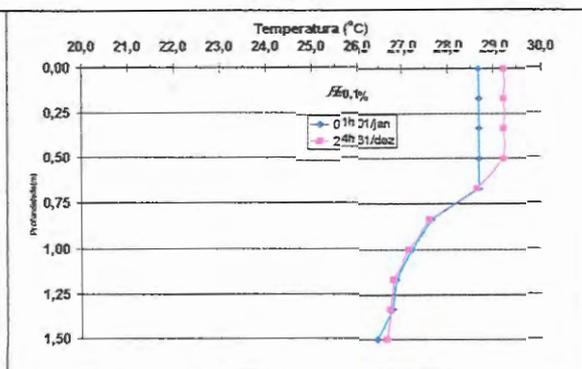


FIGURA 4.7: Comparação entre os perfis de temperatura de 1/jan com o perfil de 31/dez para a simulação de Santa Fé do Sul (SP)

Analisando a FIGURA 4.6 é possível observar que os perfis de temperatura simulados para a lagoa de Campina Grande (PB), considerando-se $\varepsilon = 1,0\%$, apresentam valores muito próximos uns dos outros, sendo que a máxima diferença percentual obtida foi de 2,1% observada junto ao fundo da lagoa.

Caso semelhante pode ser observado na FIGURA 4.7, para o qual os perfis de temperatura de Santa Fé do Sul (SP), foram simulados considerando-se $\varepsilon = 0,1\%$. Neste caso, a máxima diferença percentual foi de 1,8% observada junto à superfície da lagoa.

4.2 - Formulação para cálculo do volume útil

Conforme apresentado no início deste capítulo, definiu-se *volume útil* da lagoa de estabilização como sendo o volume compreendido entre a termoclina e a superfície líquida. Dessa maneira, define-se volume sub-utilizado como sendo o volume líquido abaixo da termoclina.

Por definição, termoclina é o nome dado à descontinuidade do perfil de temperatura que é observada em um corpo líquido termicamente estratificado (ESTEVEES,1988). Com isso, pode-se dizer que a termoclina é um fenômeno observado em um volume líquido estratificado termicamente.

Segundo ESTEVES (1988) e BIANCHINI Jr²⁸. (1999) é com base na diferença de densidade da água entre 4°C e 5°C que se define a estratificação térmica com um gradiente de 1°C/m.

BRACHO et al. (1998) consideraram a ocorrência da estratificação térmica quando verificou-se diferença de 2°C na coluna líquida. Embora esses pesquisadores não tenham mencionado a relação entre essa diferença de temperatura e os pontos onde foram observados, acredita-se que se trata da diferença entre a temperatura do hipolímnio e do epilímnio.

Conhecendo-se então a área superficial da lagoa para qualquer profundidade, o volume útil pode ser obtido a partir da determinação da posição da termoclina em relação a profundidade da lagoa, conforme a equação (4.23).

$$V_{\text{UTIL}} = \left(\frac{A_k + A_N}{2} \right) \cdot h_{\text{util}} \quad (4.23)$$

sendo V_{UTIL} o volume útil da lagoa (m^3); A_N a área superficial da lagoa (m^2); A_k a área superficial do elemento k , onde foi verificado a formação da termoclina (m^2); e h_{util} a altura útil da lagoa (m).

Com isso, a fração utilizada do volume físico da lagoa de estabilização pode ser representada aproximadamente pela equação (4.24).

$$\% \text{ Utilizado} = \frac{V_{\text{UTIL}}}{V_{\text{TOTAL}}} \times 100 \quad (4.24)$$

onde V_{TOTAL} é o volume total da lagoa (m^3) e, V_{UTIL} é o volume útil da lagoa (m^3).

A altura útil é determinada pela equação (4.25).

$$h_{\text{util}} = (N + 1 - i) \cdot \Delta z \quad (4.25)$$

²⁸ BIANCHINI Jr., Irineu. (1999). *Gradiente Térmico*.(informação pessoal) irineu@power.ufscar.br (11/06/1999)

sendo h_{ini} a profundidade em que se observa a formação da termoclina (m); i o elemento de controle onde ocorreu a termoclina; Δz a altura do elemento de controle (m), e N é o número de pontos da vertical utilizado para o cálculo do perfil de temperatura.

Para a determinação da ocorrência da estratificação térmica no modelo matemático desenvolvido, propôs-se três critérios de análise, baseados no gradiente de densidade da água, no gradiente de temperatura e na diferença de temperatura entre o epilímnio e o hipolímnio.

4.2.1 – Critério do Gradiente de Densidade

Conforme apresentado no capítulo 3 tem-se, por definição, o surgimento da estratificação térmica a partir do gradiente térmico de $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$, tomando-se como referência o intervalo de temperatura entre 4°C e 5°C . Considerando a massa específica da água para as temperaturas de 4°C e 5°C , tem-se uma diferença da ordem de $0,008 \text{ kg}/\text{m}^3$. Sendo assim, pode-se dizer que, quando a variação térmica entre dois pontos proporcionar uma diferença de densidade igual ou superior a $(0,008 \text{ kg}/\text{m}^3)/\text{m}$, o corpo líquido estará termicamente estratificado.

Considerando-se, porém, o gradiente térmico de $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$, tomando-se como referência o intervalo de temperatura entre 26°C e 27°C , por exemplo, observa-se uma diferença na densidade da água superior aos $0,008 \text{ kg}/\text{m}^3$, conforme mostrado na FIGURA 4.8, indicando que a estratificação térmica já teria se formado em um intervalo de temperatura inferior a 1°C .

Analisando a FIGURA 4.8 observa-se que o surgimento do gradiente de densidade de $(0,008 \text{ kg}/\text{m}^3)/\text{m}$ pode ocorrer para diferentes intervalos de temperatura, dependendo, basicamente da magnitude da temperatura de referência.

Assim, o critério do Gradiente de Densidade utiliza-se, então, da diferença de densidade da água, observada a partir da definição do fenômeno da estratificação térmica, aplicando-o aos demais intervalos de temperatura. Dessa maneira, sempre que a diferença de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio for superior a $0,008 \text{ kg}/\text{m}^3$ considera-se a lagoa estratificada.

Caso seja observado que a diferença de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio seja superior a $0,008 \text{ kg}/\text{m}^3$, o modelo procura o trecho que apresenta o maior gradiente de densidade determinando-se, então, o local de formação da termoclina.

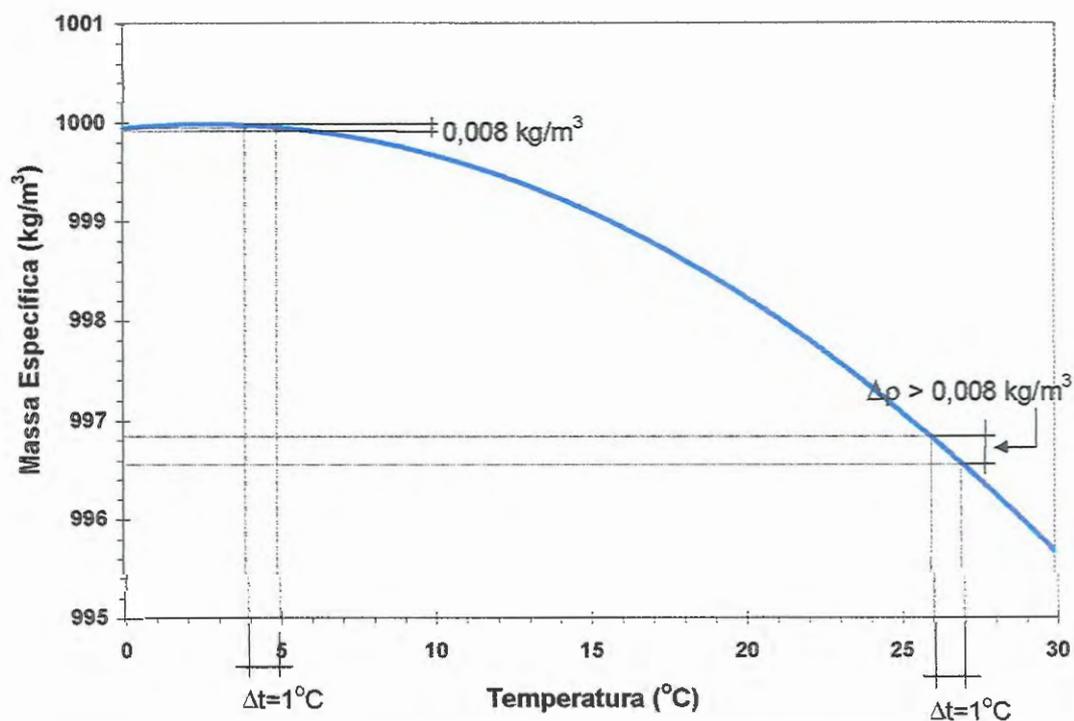


FIGURA 4.8: Comparação da diferença da densidade da água para dois intervalos de temperatura distintos.

A FIGURA 4.9 mostra o fluxograma para determinação da altura útil e do volume útil empregando-se o critério do gradiente de densidade.

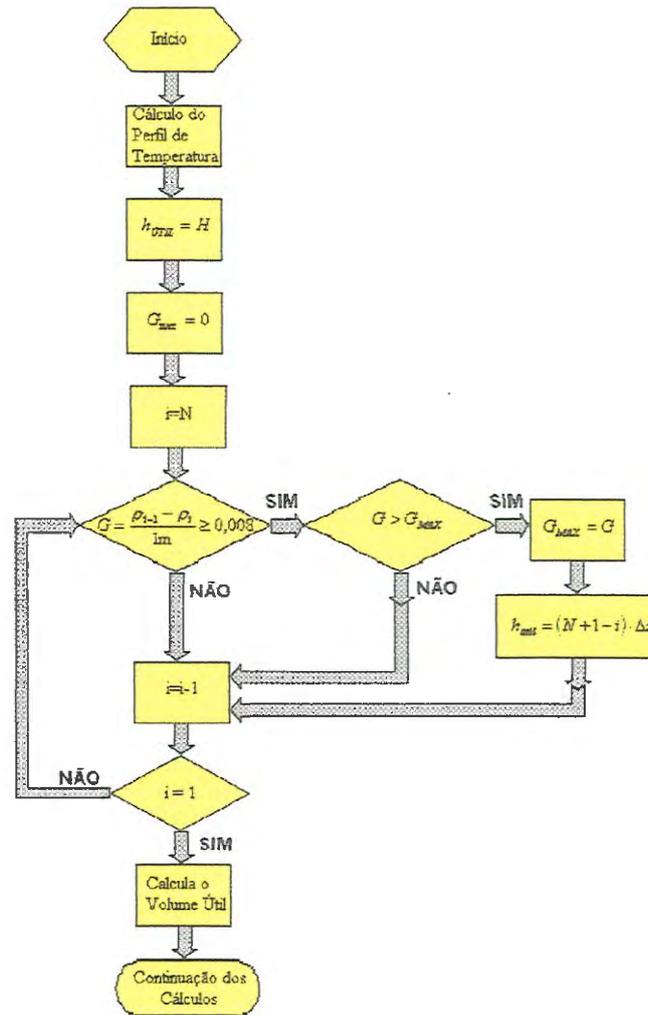


FIGURA 4.9: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério do gradiente de densidade.

4.2.2 – Critério do Gradiente de Temperatura

O critério do gradiente de temperatura parte do princípio que, ao encontrar-se um gradiente térmico maior ou igual a $1^\circ\text{C}/\text{m}$, por exemplo, no perfil térmico simulado, há a ocorrência da estratificação térmica.

O método proposto consiste em, fixado um gradiente térmico (G), verificar se a diferença de temperatura entre a superfície líquida e o fundo da lagoa, em relação a profundidade é maior ou igual ao gradiente fixado. Caso essa observação seja verdadeira, o modelo procura qual o maior gradiente de temperatura existente entre dois elementos consecutivos.

A FIGURA 4.10 mostra o fluxograma para determinação da profundidade da termoclina, assim como o cálculo do volume útil da lagoa.

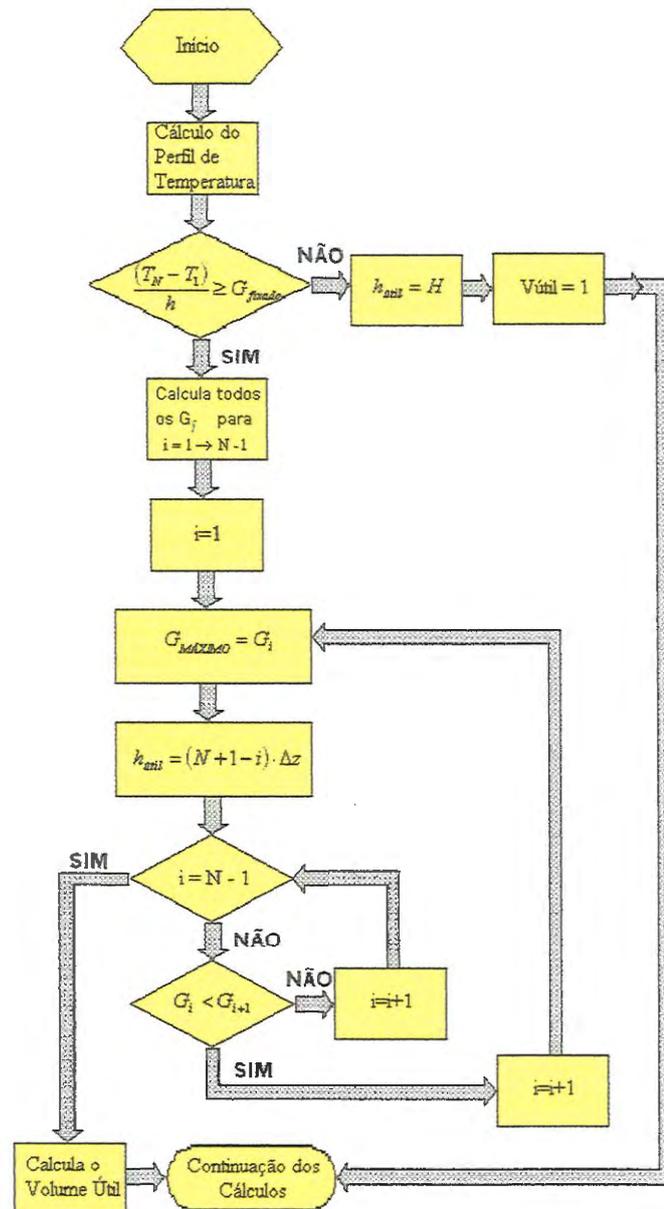


FIGURA 4.10: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério do gradiente de temperatura.

Encontrado o maior gradiente de temperatura entre dois elementos consecutivos, a altura útil é calculada e, em seguida, o volume útil da lagoa de estabilização.

4.2.3 – Critério da Diferença de Temperatura

Este terceiro critério, da Diferença da Temperatura, é muito semelhante aos outros dois descritos anteriormente.

Neste caso específico, é utilizada a diferença de temperatura entre pontos contidos no hipolimnio e pontos contidos no epilimnio, como forma de determinar a ocorrência da estratificação térmica.

Assim, definida uma diferença de temperatura mínima para que fique caracterizada a ocorrência da estratificação térmica, 1,5°C por exemplo, o modelo passa a verificar a diferença de temperatura entre os pares (i e $N+1-i$) de temperaturas opostos entre si.

Ao encontrar o par de pontos que resulta na diferença de temperatura imediatamente superior àquela fixada, o modelo verifica o número do elemento, mais próximo à superfície líquida, no qual ocorreu a formação da termoclina. Em seguida, o modelo calcula a altura útil e o volume útil da lagoa.

A FIGURA 4.11 mostra o fluxograma para determinação da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério da diferença de temperatura.

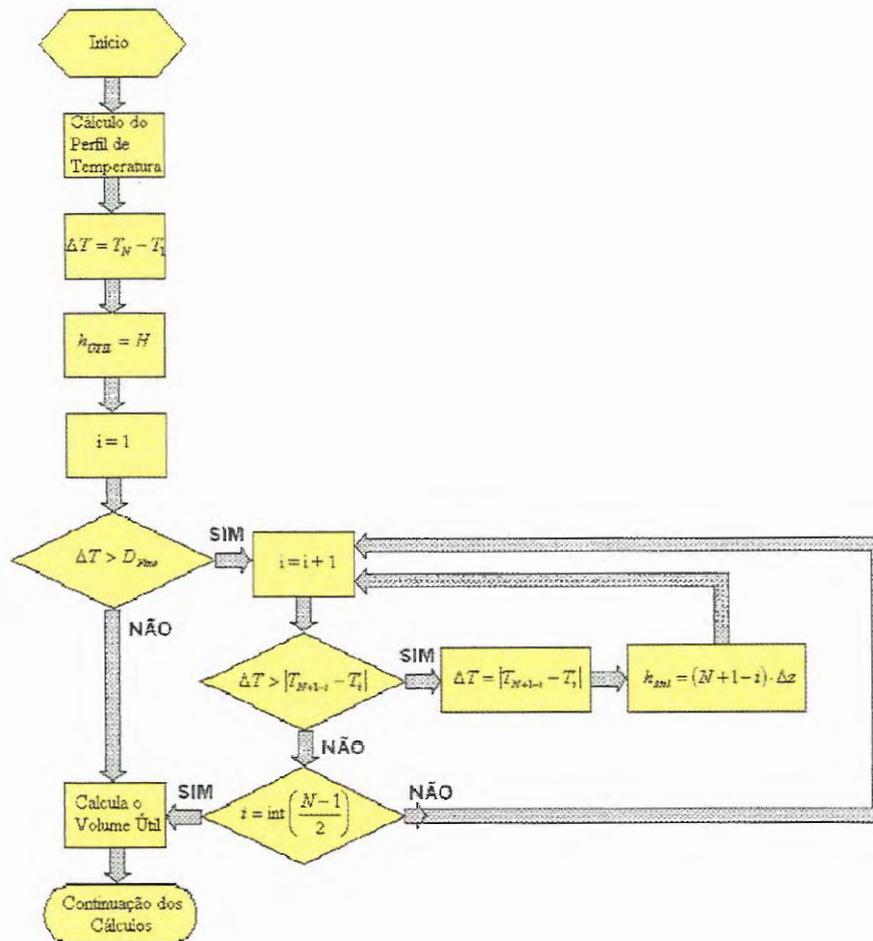


FIGURA 4.11: Fluxograma do procedimento de cálculo da profundidade da termoclina e do cálculo do volume útil da lagoa empregando o critério da diferença de temperatura.

4.3 – Avaliação dos Resultados Obtidos na Simulação Numérica

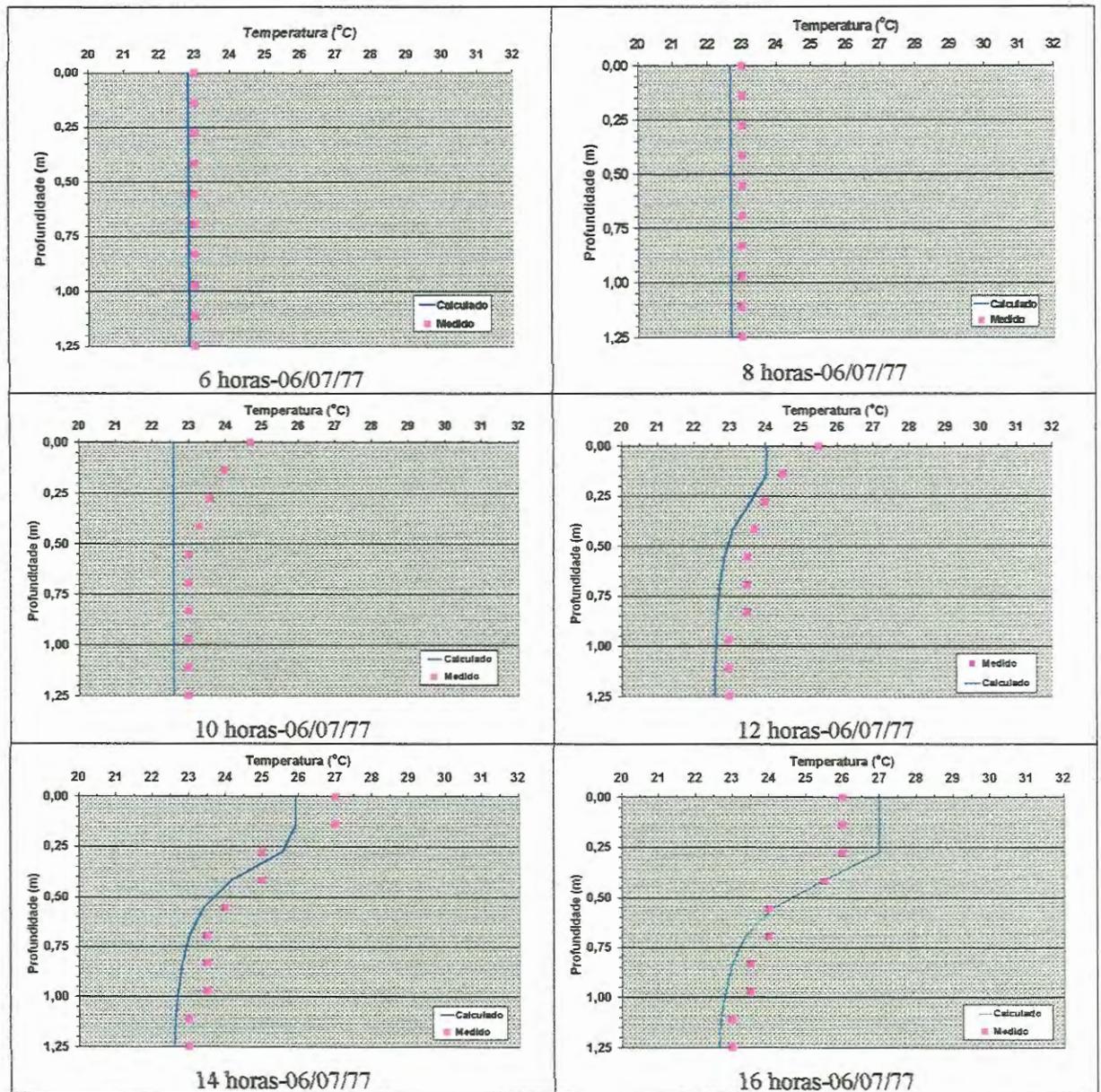
Conforme apresentado anteriormente, o cálculo do volume útil da lagoa de estabilização, depende do perfil de temperatura assim como da escolha de um dos três critérios apresentados para verificação da ocorrência da estratificação térmica.

A fim de avaliar os resultados fornecidos pelo modelo matemático, comparou-se as temperaturas ao longo da profundidade de uma lagoa facultativa, obtidas experimentalmente por SILVA (1982) para a região de Campina Grande (PB) e, VIDAL (1983) para região de Santa Fé do Sul (SP), com os perfis de temperatura calculados a partir do modelo apresentado.

4.3.1 – Avaliação dos Resultados para Região de Campina Grande (PB)

SILVA (1982) obteve experimentalmente, entre os dias 06 e 07 de julho de 1977, em uma lagoa facultativa localizada em Campina Grande (PB), os valores de temperatura ao longo da profundidade.

A partir das características físicas da lagoa, do afluente e do local de implantação, calculou-se o perfil de temperatura da lagoa facultativa de Campina Grande-PB. Para essa simulação, empregou-se o passo (h) igual a 0,5 hora, tanto para o método de Heun como para o método de Runge-Kutta. A aplicação desses dois métodos resultou em dois perfis de temperatura idênticos, representados na FIGURA 4.12, conjuntamente com os pontos experimentais obtidos por SILVA (1982).



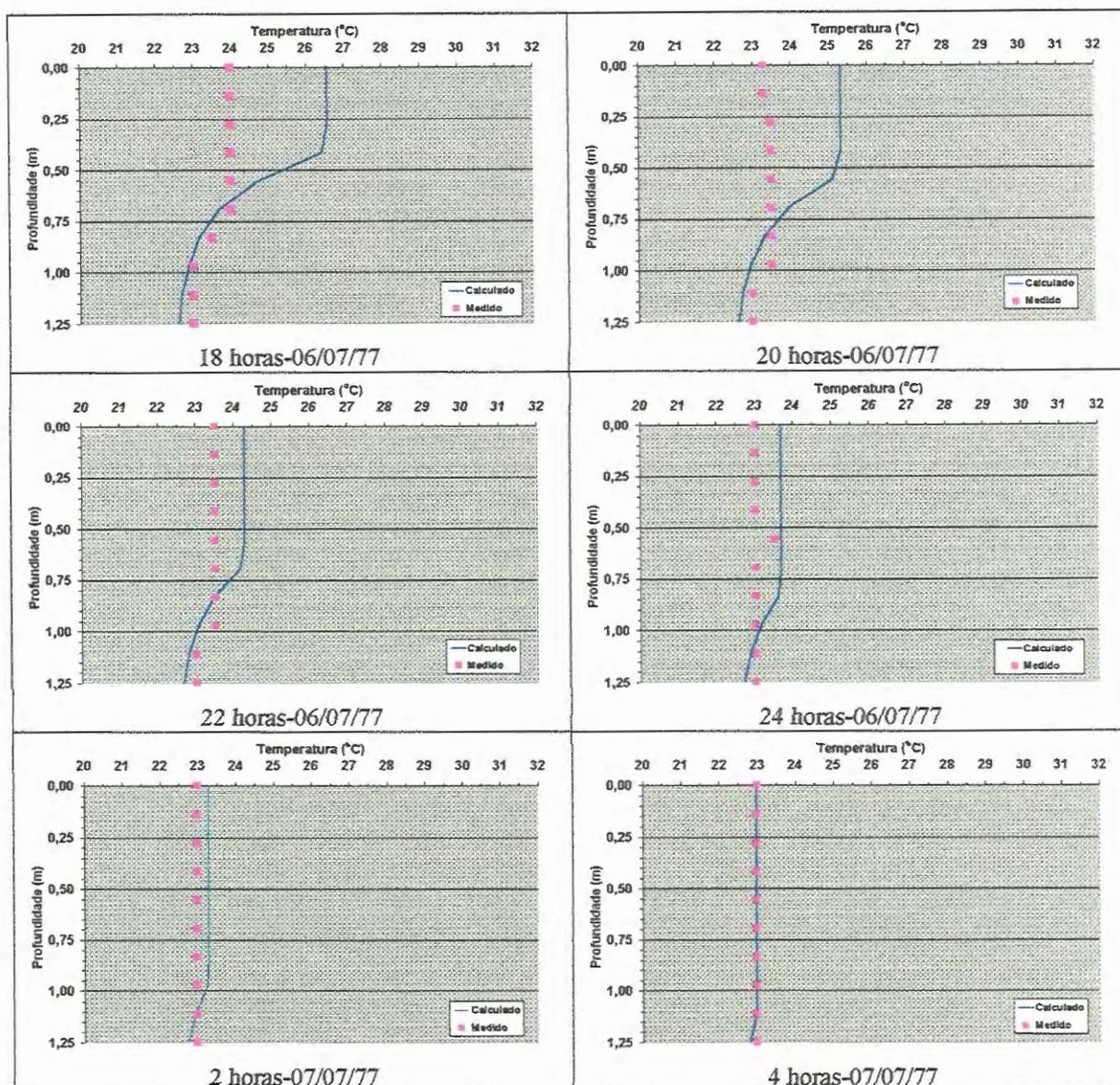


FIGURA 4.12: Perfis de temperatura calculados e obtidos *in loco* em uma lagoa facultativa em Campina Grande (PB)

NOTA: Dados experimentais de SILVA (1982), curva teórica: este trabalho.

Analisando a FIGURA 4.12, observa-se que às 6h, a lagoa facultativa apresentava temperatura uniforme em toda a sua profundidade, sendo os valores calculados praticamente os mesmos daqueles obtidos experimentalmente. Às 10h, devido provavelmente ao aumento da temperatura do ar, verificou-se um pequeno aumento dos valores medidos para as camadas próximas à superfície da lagoa, embora os valores calculados para o perfil de temperatura tenham permanecido constantes. Às 12h o modelo matemático registrou um sensível aumento da temperatura calculada próxima à superfície, tendência essa que também foi verificada para os dados experimentais. Entre as 14h e 16h, as temperaturas ao longo da profundidade da lagoa, atingiram seus valores máximos. Já a noite, aproximadamente às 22h,

provavelmente devido à diminuição da temperatura do ar verificou-se uma diminuição da temperatura superficial da lagoa. O aumento da região do epilímnio foi provavelmente formada devido a inversão térmica (ou virada convectiva), já que o resfriamento das águas superficiais tornaram-nas mais densas, provocando seu deslocamento para o fundo e promovendo a mistura entre algumas camadas situadas logo abaixo. Pode-se observar que esse processo de mistura vertical ocorreu até aproximadamente às 4h do dia seguinte, quando praticamente, ao longo de toda a vertical, observava-se a temperatura constante.

Após o cálculo dos perfis de temperatura, comparou-se os resultados simulados com os valores obtidos experimentalmente, determinando-se a diferença relativa percentual entre eles, assim como sua distribuição ao longo da profundidade da lagoa, FIGURA 4.13.

Analisando a FIGURA 4.13 observa-se que a maioria dos resultados simulados diferiram de -5% a $+5\%$ do valor experimental. As maiores diferenças percentuais obtidas estão localizadas na região próxima à superfície.

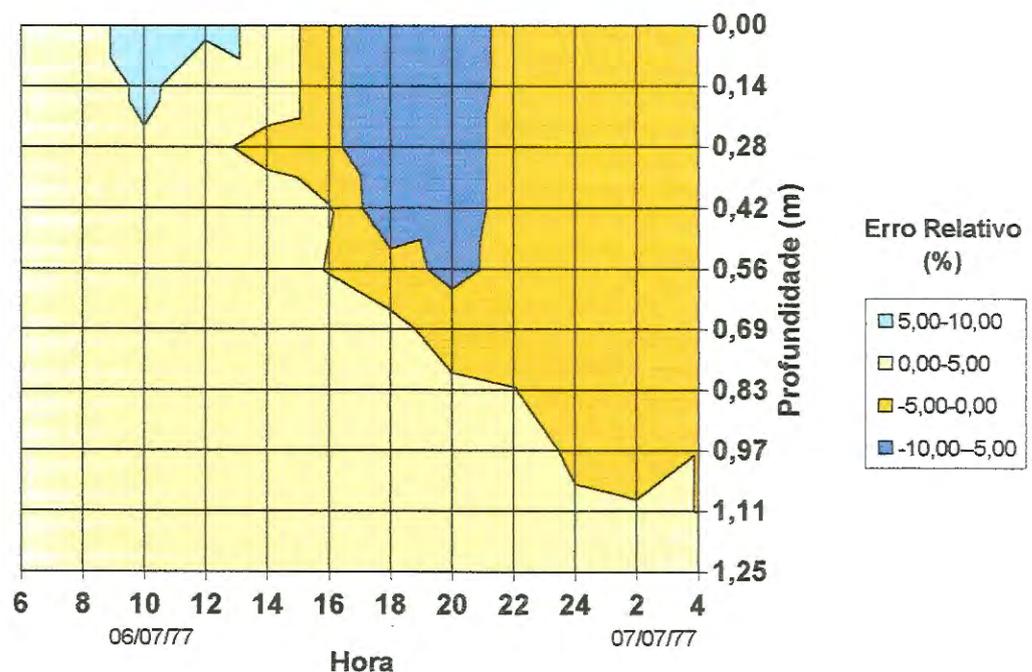


FIGURA 4.13: Distribuição da diferença relativa percentual entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as temperaturas simuladas para a lagoa facultativa de Campina Grande (PB)

O fato das maiores diferenças percentuais localizarem-se junto à superfície da lagoa, provavelmente, deve estar relacionada ao complexo mecanismo de troca de energia térmica entre a superfície líquida da lagoa e o ar. Vale ressaltar que os horários em que ocorrem as maiores diferenças correspondem ao zênite solar ($\sim 12h$) e ao por do sol ($\sim 18h$) estando as

temperaturas, no primeiro horário, sendo superestimadas pelo modelo, enquanto no segundo horário estariam sendo subestimadas.

Em seguida, determinou-se a variação do volume útil da referida lagoa ao longo do ano, considerando as três hipóteses apresentadas para a ocorrência da estratificação: critério do gradiente de densidade, critério do gradiente de temperatura e critério da diferença de temperatura.

Para cada um dos três critérios verificados, determinou-se o volume útil durante as horas em que o Sol estava acima do horizonte, durante as horas em que o Sol estava abaixo do horizonte e durante as 24 horas do dia.

A FIGURA 4.14 mostra a variação do volume útil da lagoa de Campina Grande, segundo o critério do gradiente de densidade da água. É possível observar que durante as horas em que o Sol está acima do horizonte, o volume útil da lagoa de estabilização atinge aproximadamente 45% do volume útil total; já durante a noite, devido ao resfriamento das camadas superiores e a ocorrência da inversão térmica, o volume útil da lagoa de estabilização aumentou para, aproximadamente 85% do volume total.

Observando essa variação do volume útil ao longo de um dia, é possível identificar a ocorrência diária do fenômeno de estratificação/desestratificação na lagoa.

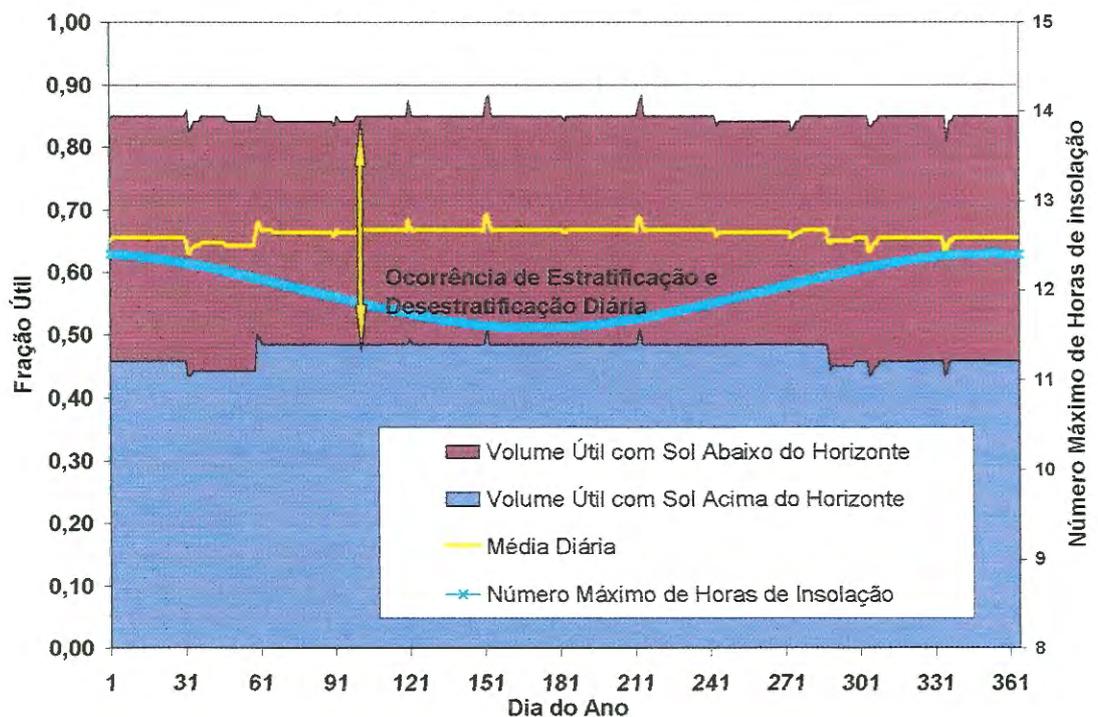


FIGURA 4.14: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério do gradiente de densidade da água.

A FIGURA 4.14 permite visualizar que, de acordo com o critério do gradiente de densidade da água, a profundidade média da termoclina permanece praticamente constante ao longo do ano. Observa-se também que há diferença significativa entre a profundidade média da termoclina durante o período de insolação e durante o período noturno, mas que os valores respectivos mantêm-se, também, praticamente constantes ao longo do ano.

A FIGURA 4.15 mostra a variação do volume útil da lagoa de Campina Grande, segundo o critério do gradiente de temperatura, fixado em $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Observa-se que durante as horas com o Sol acima do horizonte, o aquecimento das camadas superiores e o conseqüente aumento da temperatura superficial, contribuiu para a ocorrência da estratificação térmica, com a termoclina formada aproximadamente a meia profundidade. Durante a noite, com o Sol abaixo do horizonte, a diminuição da temperatura superficial da água, ocasionou a diminuição da diferença de temperatura entre o hipolímnio e o epilímnio e a conseqüente diminuição do gradiente de temperatura na lagoa, resultando então no aumento do volume útil.

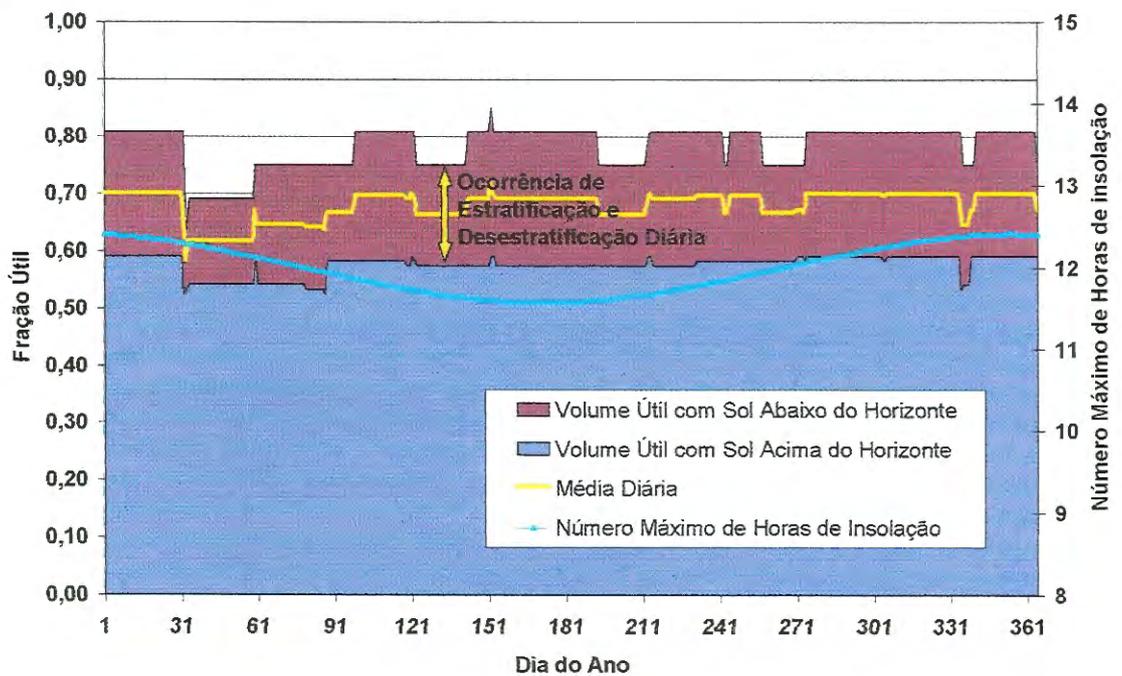


FIGURA 4.15: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério do gradiente de temperatura.

Neste caso, observa-se (ver FIGURA 4.15) uma maior variação do volume útil da lagoa facultativa de Campina Grande (PB) em relação aos dias do ano, devido provavelmente às variações climáticas características de cada mês. Durante as horas com o Sol acima do horizonte, o volume útil variou de $56 \pm 3\%$ do volume total; já durante a noite,

o volume útil variou de $74 \pm 11\%$ do volume total. Deve-se notar que a posição média da termoclina em relação a profundidade útil total da lagoa facultativa manteve-se, ao longo de todo o ano, na faixa de $65 \pm 7\%$.

A FIGURA 4.16 mostra a variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério da diferença de temperatura, fixado aqui em $1,25^\circ\text{C}$.

Embora a diferença de temperatura fixada resulte em um gradiente de $1^\circ\text{C}/\text{m}$, superior àquela fixado no critério da diferença de gradiente de densidade, é importante ressaltar que, durante as horas em que o Sol estava acima do horizonte o volume útil variou de $55 \pm 5\%$ do volume útil, enquanto para as horas em que o Sol estava abaixo do horizonte a variação percentual do volume útil foi de $85 \pm 10\%$. A posição média da termoclina em relação à profundidade útil da lagoa manteve-se, durante todo o ano, na faixa de $71 \pm 6\%$.

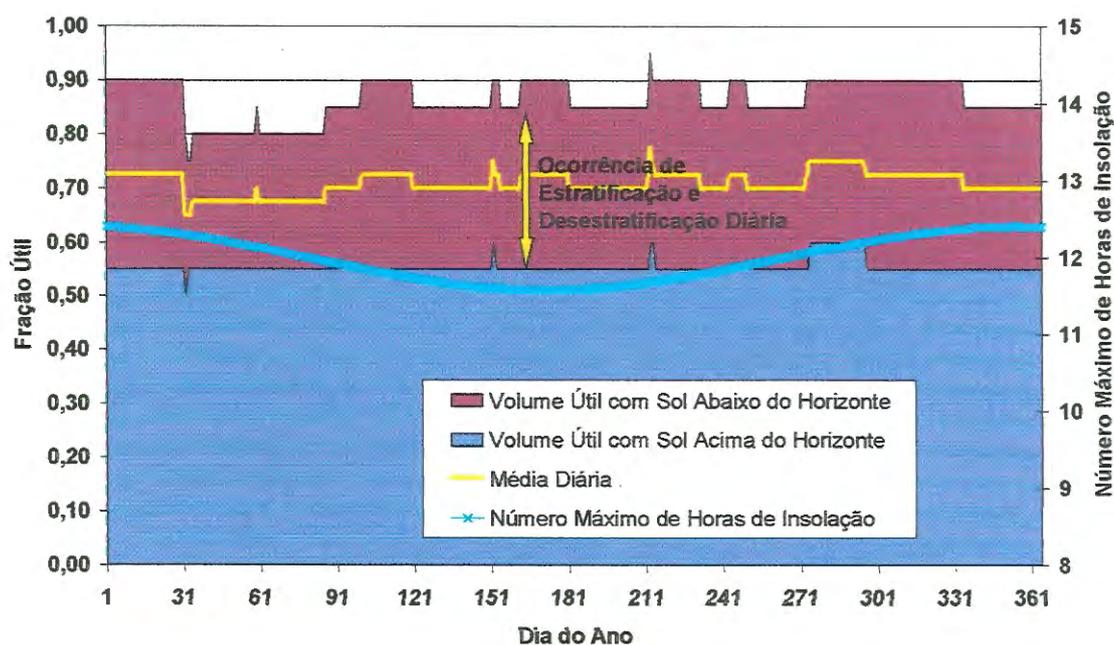


FIGURA 4.16: Variação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), segundo o critério da diferença de temperatura.

Um dado importante que deve ser observado é que, o volume útil da lagoa facultativa de Campina Grande (PB), manteve-se praticamente constante durante todo o ano, não havendo variações significativas entre os períodos de verão ou inverno. Esse fato fica mais evidente quando observa-se a variação do número teórico máximo de horas de insolação, apresentado nas FIGURAS 4.14, 4.15 e 4.16.

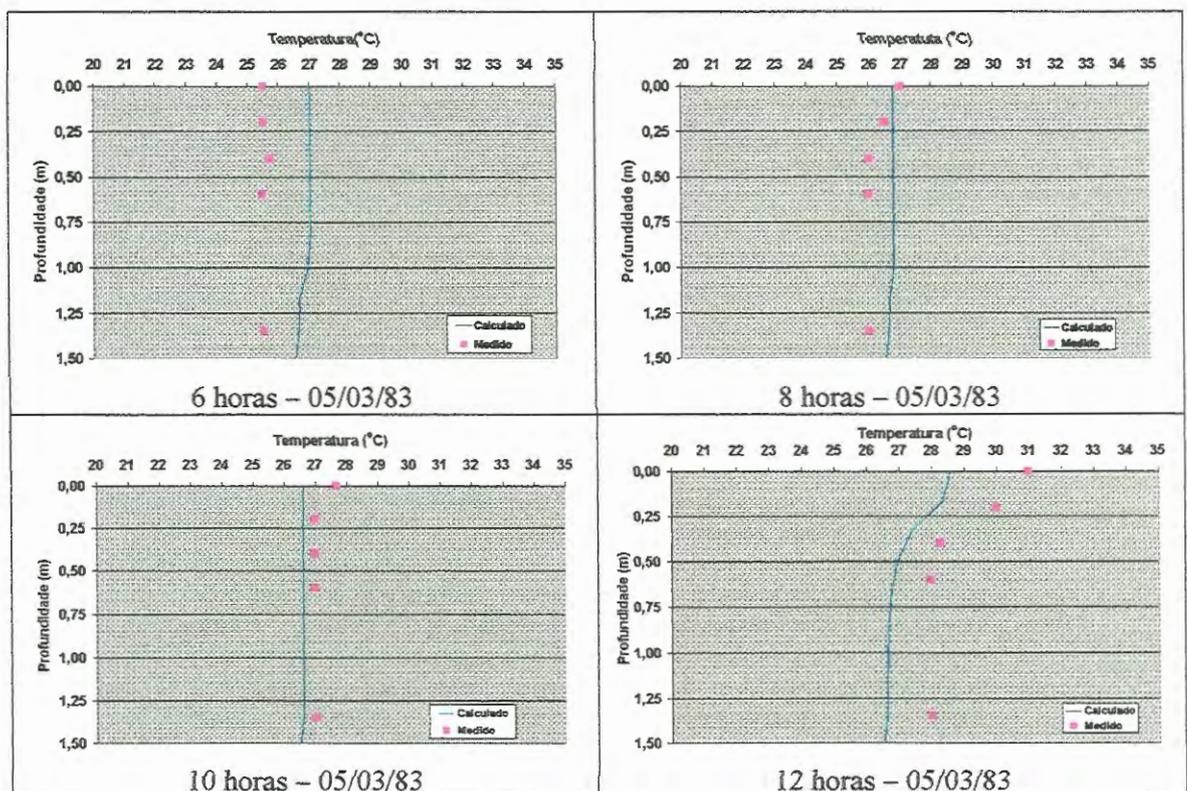
Para a região de Campina Grande (PB), a variação do número máximo de horas de insolação é de $12,0 \pm 0,4$ horas, o que pode ser considerado como praticamente constante ao longo do ano.

4.3.2 – Avaliação dos Resultados para Região de Santa Fé do Sul (SP)

VIDAL (1983) mediu a temperatura ao longo da profundidade de uma lagoa facultativa em Santa Fé do Sul (SP). Essa lagoa possuía 80m de comprimento, 66m de largura e 1,5m de profundidade, estando as tubulações de entrada situadas a 0,30m abaixo da superfície. O tempo de detenção hidráulico dessa lagoa era de aproximadamente 27,5 dias, com uma vazão média de $12 \text{ m}^3/\text{h}$.

A partir das características físicas da lagoa, do afluente e do local de implantação, calculou-se o perfil de temperatura da lagoa facultativa de Santa Fé do Sul (SP). Para essa simulação, empregou-se o passo (h) igual a 0,5 hora, tanto para o método de Heun como para o método de Runge-Kutta de 4ª ordem.

A aplicação desses dois métodos resultou dois perfis de temperatura idênticos, representados na FIGURA 4.17 para comparação com os dados obtidos experimentalmente por VIDAL (1983), durante o período de 05 a 06 de março de 1983.



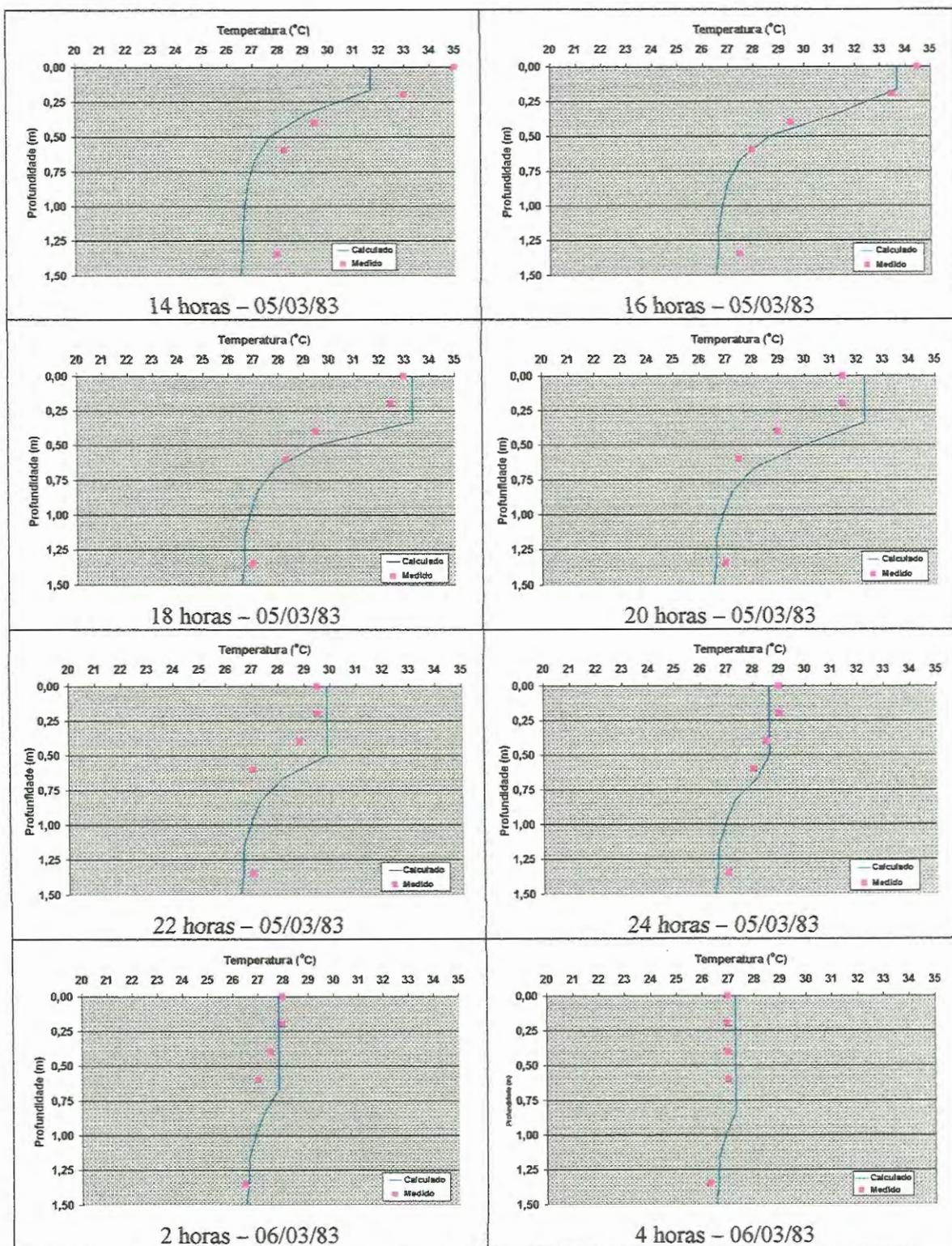


FIGURA 4.17: Perfis de temperatura calculados e obtidos *in loco* em uma lagoa facultativa em Santa Fé do Sul (SP)

NOTA: Dados experimentais de VIDAL(1983), curva teórica: este trabalho.

Analisando a FIGURA 4.17 observa-se que, em quase todo o período, a lagoa apresentou-se estratificada termicamente, ocorrendo uma rápida mistura entre as 6h e 8h.

Com o aquecimento da camada superior, estabeleceu-se um período de estratificação térmica que durou aproximadamente 22 horas.

Entre as 14h e 16h observou-se que ocorreu a maior diferença térmica entre o hipolímnio e o epilímnio, aproximadamente 7°C.

A temperatura do fundo da lagoa manteve-se praticamente constante em 27,5°C ao longo do dia. Ao contrário, a temperatura da superfície líquida variou de 27,5°C até 34,5°C.

É interessante ressaltar que, para a região de Santa Fé do Sul (SP), a altitude solar atinge seu valor máximo entre 12h e 14h.

A defasagem entre a ocorrência da máxima diferença térmica entre as camadas da superfície e do fundo da lagoa e a ocorrência da máxima altitude²⁹ solar pode ser explicada pela baixa condutividade térmica da água, o que resulta em um “retardo” no aquecimento da camada superficial.

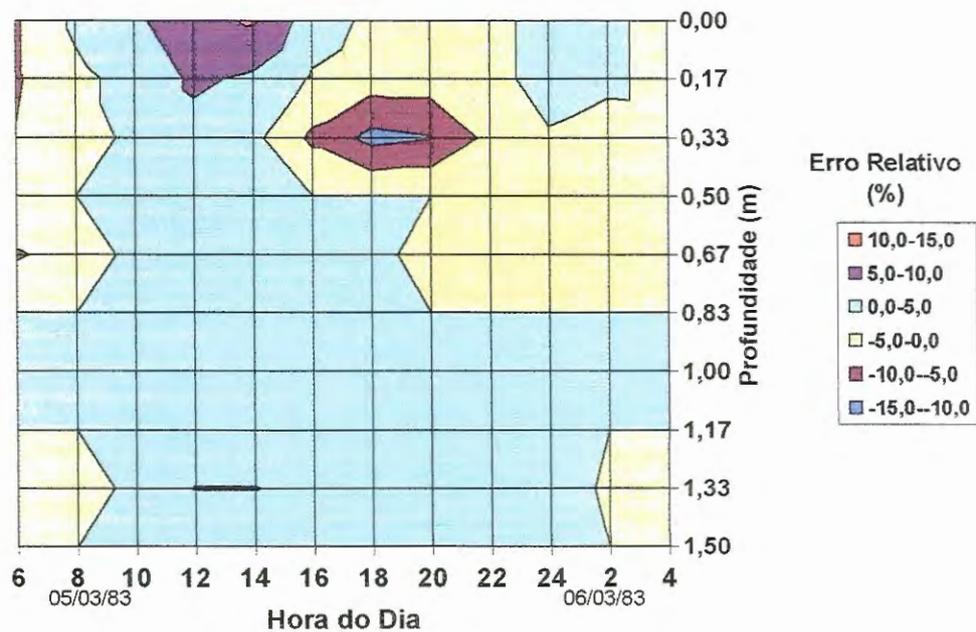


FIGURA 4.18: Distribuição da diferença relativa percentual entre as temperaturas obtidas experimentalmente e as temperaturas simuladas para a lagoa facultativa de Santa Fé do Sul (SP).

A partir da comparação dos valores das temperaturas obtidas por VIDAL (1983) e pelo modelo matemático, determinou-se os erros relativos entre eles, assim como sua distribuição ao longo da profundidade da lagoa (ver FIGURA 4.18). Semelhante ao ocorrido com a lagoa de Campina Grande (PB), observa-se que a maioria dos resultados simulados

²⁹ É importante lembrar que a energia térmica de ondas curtas incidente na superfície líquida é diretamente proporcional ao seno da altitude solar (α) (ver eq. 3.5).

variaram de -5% até $+5\%$ do valor medido. As maiores diferenças percentuais obtidas, estão localizadas na região próxima à superfície, principalmente entre as 12h e 14h.

Em seguida, determinou-se a variação do volume útil da referida lagoa ao longo do ano, considerando as três hipóteses apresentadas para a ocorrência da estratificação: critério do gradiente de densidade, critério do gradiente de temperatura e critério da diferença de temperatura.

Para cada um dos três critérios verificados, determinou-se o volume útil durante as horas em que o Sol estava acima do horizonte, durante as horas em que o Sol estava abaixo do horizonte e durante as 24 horas do dia.

A FIGURA 4.19 mostra a variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul, segundo o critério do gradiente de densidade da água.

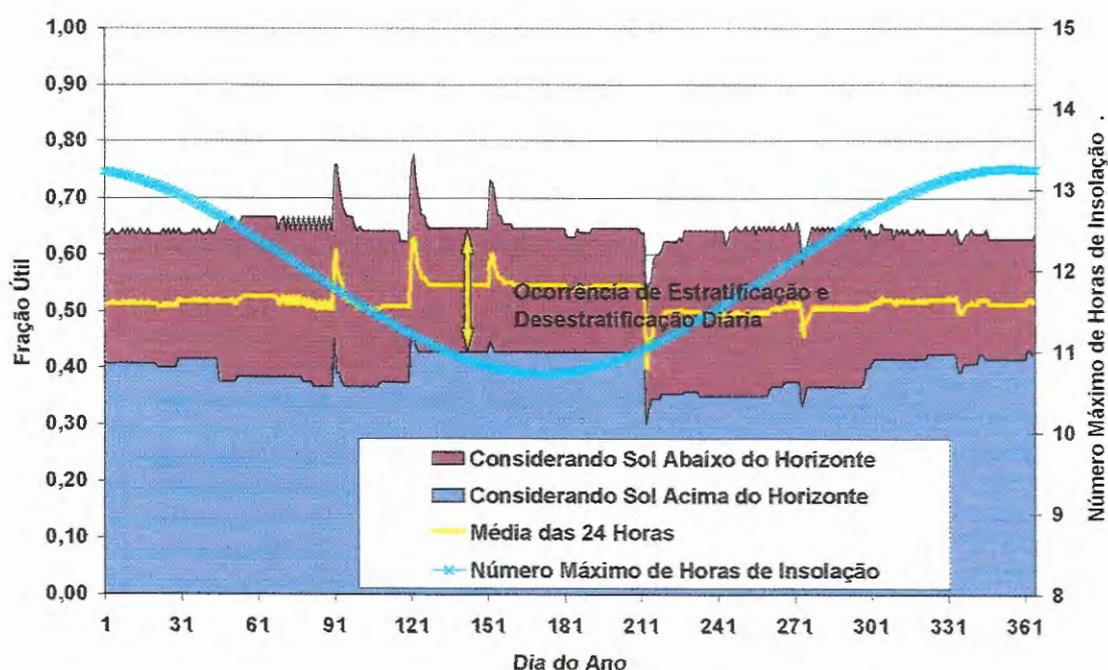


FIGURA 4.19: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério do gradiente de densidade da água.

Analisando a FIGURA 4.19 observa-se que durante as horas em que o Sol está acima do horizonte, o volume útil da lagoa de estabilização atinge aproximadamente 40% do volume útil total; já durante a noite, devido ao resfriamento das camadas superiores e a ocorrência da inversão térmica, o volume útil da lagoa de estabilização aumentou para, aproximadamente 63% do volume útil total. Assim, é possível identificar a ocorrência diária do fenômeno de estratificação/desestratificação da lagoa.

A FIGURA 4.19 permite visualizar que, de acordo com o critério do gradiente de densidade, a profundidade média da termoclina permaneceu praticamente constante ao longo do ano. Observa-se também que há diferença significativa entre a profundidade média da termoclina durante o período de insolação e durante o período noturno, mas que os valores respectivos mantêm-se praticamente constantes ao longo do ano, semelhante ao ocorrido com a lagoa de Campina Grande (PB).

A FIGURA 4.20 mostra a variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul, segundo o critério do gradiente de temperatura, fixado em $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

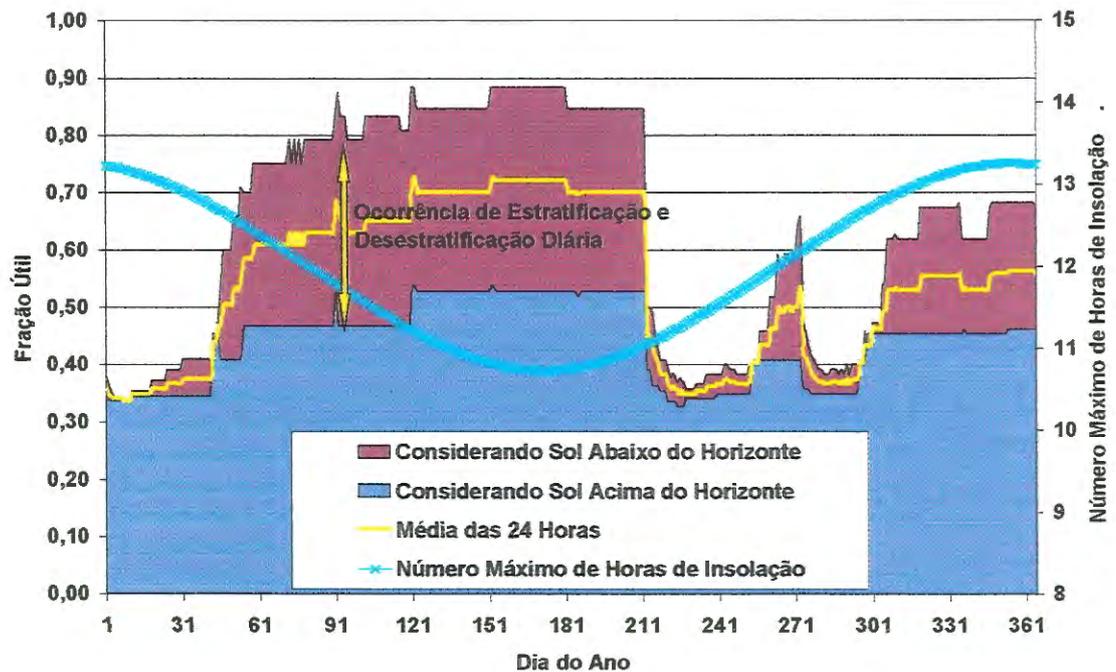


FIGURA 4.20: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério do gradiente de temperatura.

A FIGURA 4.20 mostra que durante as horas com o Sol acima do horizonte, o aquecimento das camadas superiores e o conseqüente aumento da temperatura superficial, contribuiu para a ocorrência da estratificação térmica. Durante a noite, com o Sol abaixo do horizonte, provavelmente devido a diminuição da temperatura superficial da água, ocorreu a diminuição da diferença de temperatura entre o hipolímnio e o metalímnio e a conseqüente diminuição do gradiente de temperatura na lagoa, resultando então no aumento do volume útil. Vê-se que durante as horas com o Sol acima do horizonte, o volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul variou de $43 \pm 10\%$ do volume total; já durante a noite, o volume útil variou de $61 \pm 27\%$ do volume útil.

Deve-se notar que a posição média da termoclina em relação à profundidade útil total da lagoa facultativa manteve-se, ao longo de todo o ano, na faixa de $53 \pm 19\%$.

É interessante observar que, de acordo com o critério do gradiente de temperatura, durante o período de outono/inverno é que ocorreram as maiores variações do volume útil, havendo um maior aproveitamento do volume físico da lagoa. No entanto do início de Janeiro, até meados de Fevereiro a simulação numérica indicou um aproveitamento de aproximadamente 35% do volume físico da lagoa, não sendo identificado uma grande contribuição do fenômeno de desestratificação para o aumento do volume útil da lagoa.

A FIGURA 4.21 mostra a variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério da diferença de temperatura, fixado aqui em $1,50^\circ\text{C}$.

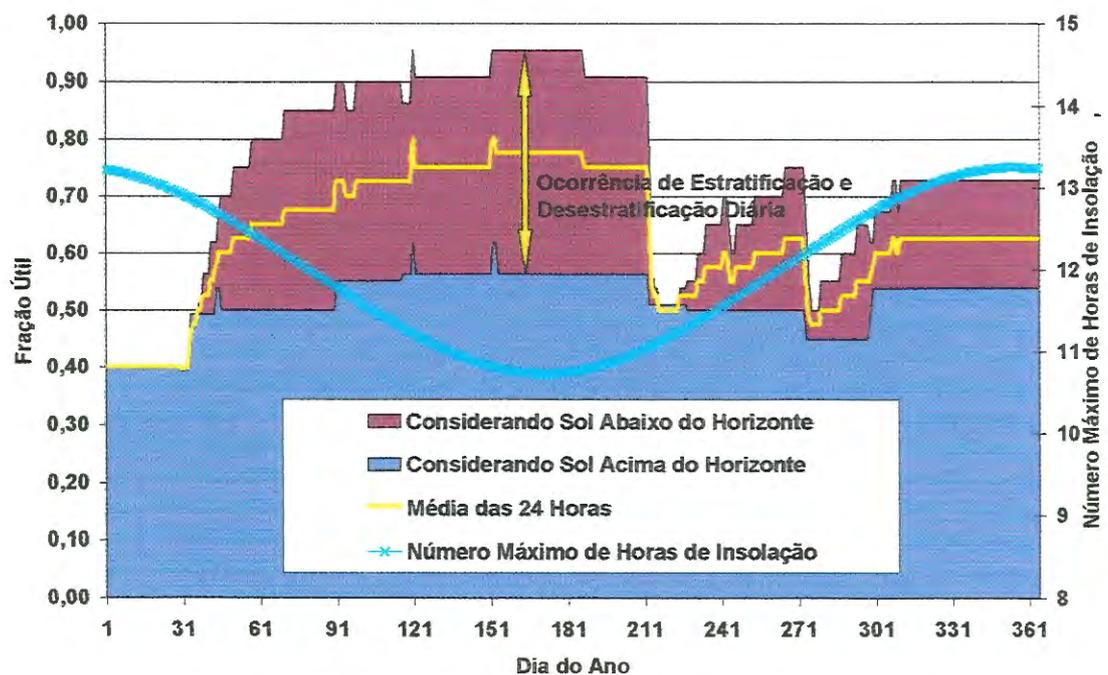


FIGURA 4.21: Variação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), segundo o critério da diferença de temperatura.

Embora a diferença de temperatura fixada resulte em um gradiente térmico de $1^\circ\text{C}/\text{m}$, superior àquela fixado no critério da diferença de gradiente de densidade, é importante ressaltar que, durante as horas em que o Sol estava acima do horizonte o volume útil variou de $51 \pm 11\%$ do volume útil, enquanto para as horas em que o Sol estava abaixo do horizonte a variação percentual do volume útil foi de $68 \pm 28\%$. A posição média da termoclina em relação a profundidade útil da lagoa manteve-se, durante todo o ano, na faixa de $60 \pm 20\%$, valores muito próximos daqueles obtidos para o gradiente de $0,6^\circ\text{C}/\text{m}$.

Observa-se nas FIGURAS 4.20 e 4.21 que o volume útil da lagoa facultativa de Santa Fé do Sul (SP) variou muito ao longo do ano. Esse fato fica mais evidente quando observa-se a variação do número teórico máximo de horas de insolação. Para a região de Santa Fé do Sul (SP), a variação do número teórico máximo de horas de insolação é de $12,0 \pm 1,3$ horas.

Observe-se que no caso da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) há considerável diferença entre os resultados obtidos pelos critérios do gradiente de densidade e gradiente de temperatura e diferença de temperatura. Uma discussão detalhada desse problema encontra-se na seção 6.4 – Determinação do Volume Útil, embora possa-se adiantar que o critério do gradiente de temperatura parece ser mais adequado para o cálculo do volume útil.

4.3.3 – Simulações e Estudos de Casos

A fim de verificar a influência das condições climáticas e geográficas do local de implantação, assim como das características físicas das lagoas facultativas apresentadas nos itens 4.3.1 e 4.3.2, propôs-se dois estudos de caso:

- a.) simulação dos perfis de temperatura de uma lagoa com as mesmas características daquela instalada em Santa Fé do Sul (SP), só que agora locada em Campina Grande (PB);
- b.) simulação dos perfis de temperatura de uma lagoa com as mesmas características daquela instalada em Campina Grande (PB), só que agora locada em Santa Fé do Sul (SP).

Considerando o método do gradiente de temperatura, fixado em $0,6^\circ\text{C}/\text{m}$, como parâmetro de determinação da ocorrência de estratificação térmica, simulou-se o comportamento do volume útil das lagoas de estabilização para os dois estudos de caso considerados.

A FIGURA 4.22 mostra os resultados das simulações para uma lagoa com 80,00m de comprimento, 66,00 m de largura, 1,50m de profundidade e vazão média de $12\text{m}^3/\text{h}$ – semelhante àquela descrita no item 4.3.2 – locada agora na região de Campina Grande (PB).

A FIGURA 4.23 apresenta os resultados das simulações de uma lagoa com 25,70m de comprimento, 7,40m de largura, 1,25m de profundidade e vazão média de $1,34\text{m}^3/\text{h}$ – semelhante àquela descrita no item 4.3.1 – locada agora na região de Santa Fé do Sul (SP).

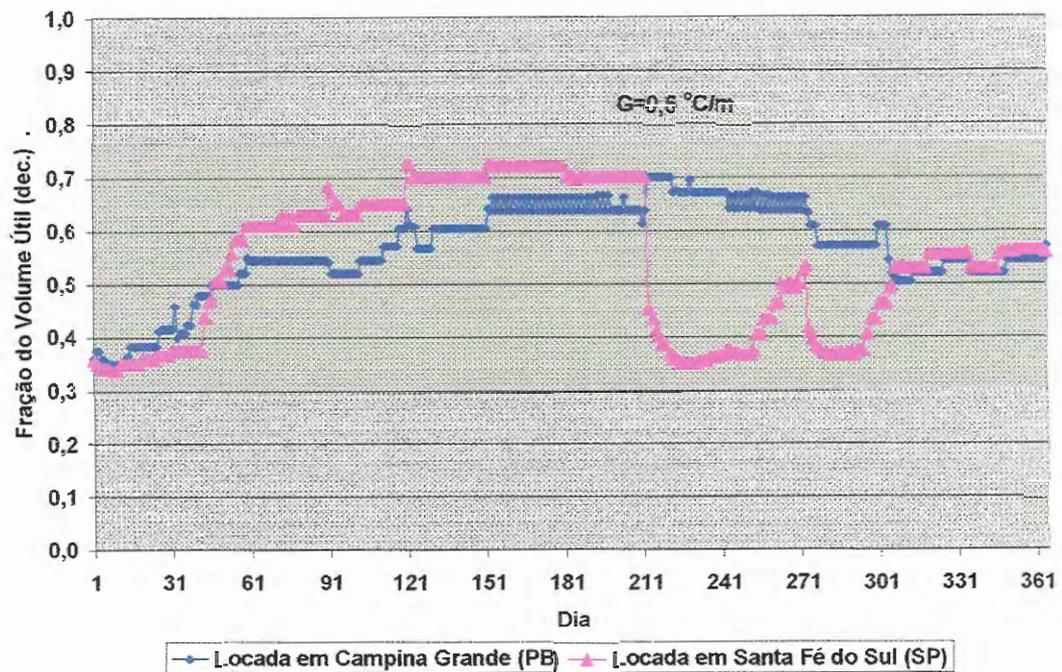


FIGURA 4.22: Variação da média diária do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) relocada em Campina Grande (PB).

Analisando o gráfico apresentado na FIGURA 4.22 observa-se que, embora a lagoa apresente as mesmas características físicas e hidráulicas daquela descrita para a região de Santa Fé do Sul (SP), seu comportamento térmico apresentou-se diferente quando locada em Campina Grande (PB). Essa observação permite supor que, para esse caso, a localização geográfica, assim como as características climáticas afetaram de forma significativa o resultado.

O gráfico apresentado na FIGURA 4.23 mostra que a lagoa de Campina Grande (PB), mesmo tendo suas características físicas e hidráulicas inalteradas, teve variação do seu aproveitamento térmico quando locada em Santa Fé do Sul (SP). De maneira análoga à situação anterior, supôs-se que a localização geográfica e as condições climáticas do local de implantação influenciaram o cálculo do volume útil da lagoa facultativa.

A fim de avaliar a influência da energia térmica introduzida na lagoa pelo afluente, calculou-se o comportamento do gradiente térmico durante o ano, admitindo que a vazão e a temperatura do afluente tivessem comportamento senoidal.

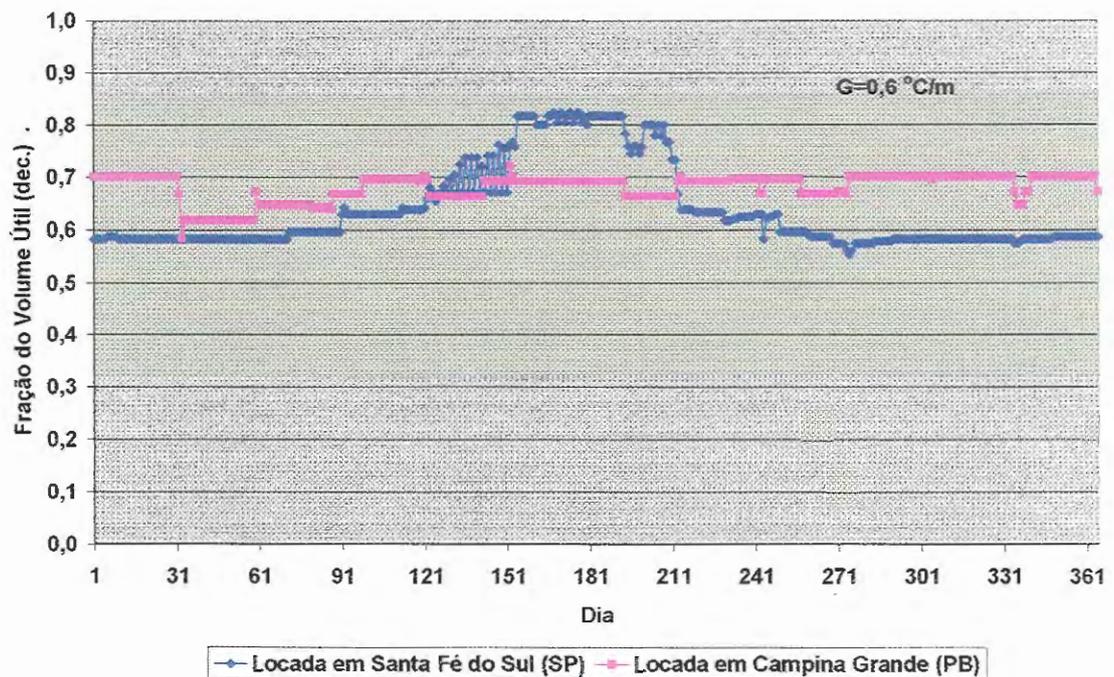


FIGURA 4.23: Variação da média diária do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB) relocada em Santa Fé do Sul (SP).

O primeiro conjunto de simulações foi feito para a região de Campina Grande (PB), considerando uma variação senoidal defasada de 90° (ou cossenoidal) anual da temperatura, compreendendo o intervalo de $26^\circ C \pm 2^\circ C$.

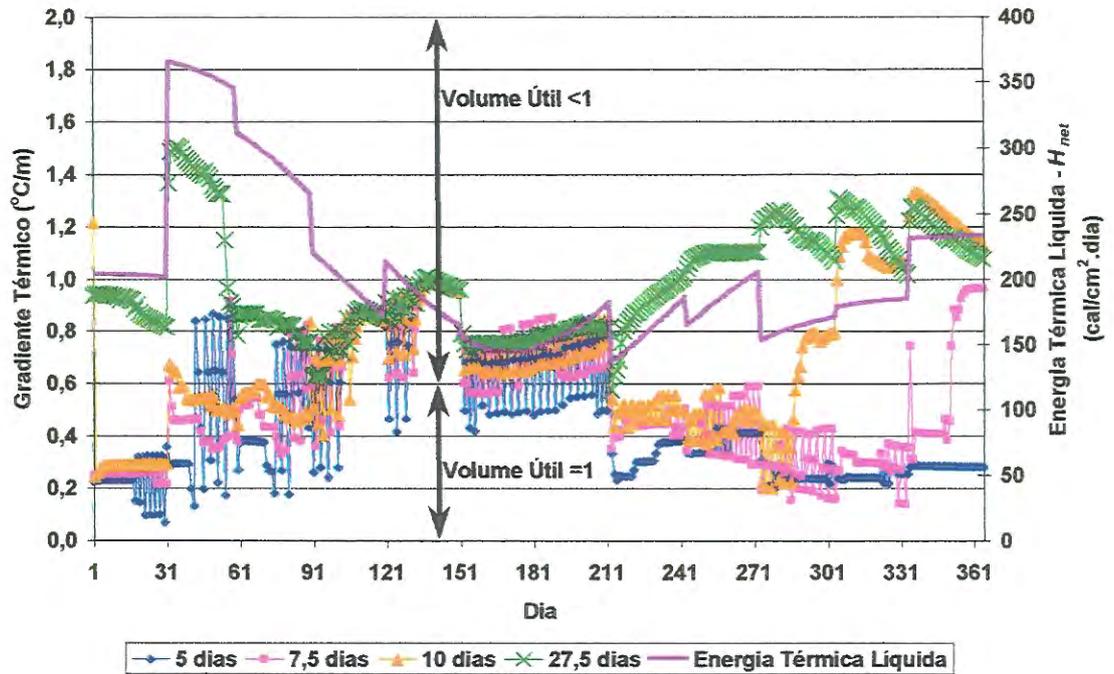
A vazão afluente também foi simulada de acordo com uma função cossenoidal, com tempos de detenção hidráulicos médios de 5; 7,5; 10; 27,5 dias, cujas vazões variaram, respectivamente, de $2,01 m^3/h \pm 1,01 m^3/h$, $1,34 m^3/h \pm 0,67 m^3/h$, $1,05 m^3/h \pm 0,50 m^3/h$ e $0,365 m^3/h \pm 0,183 m^3/h$.

A FIGURA 4.24 mostra o gráfico com a variação do gradiente térmico da lagoa facultativa ao longo do ano, assim como a variação da média diária de energia líquida fornecida pelo ambiente.

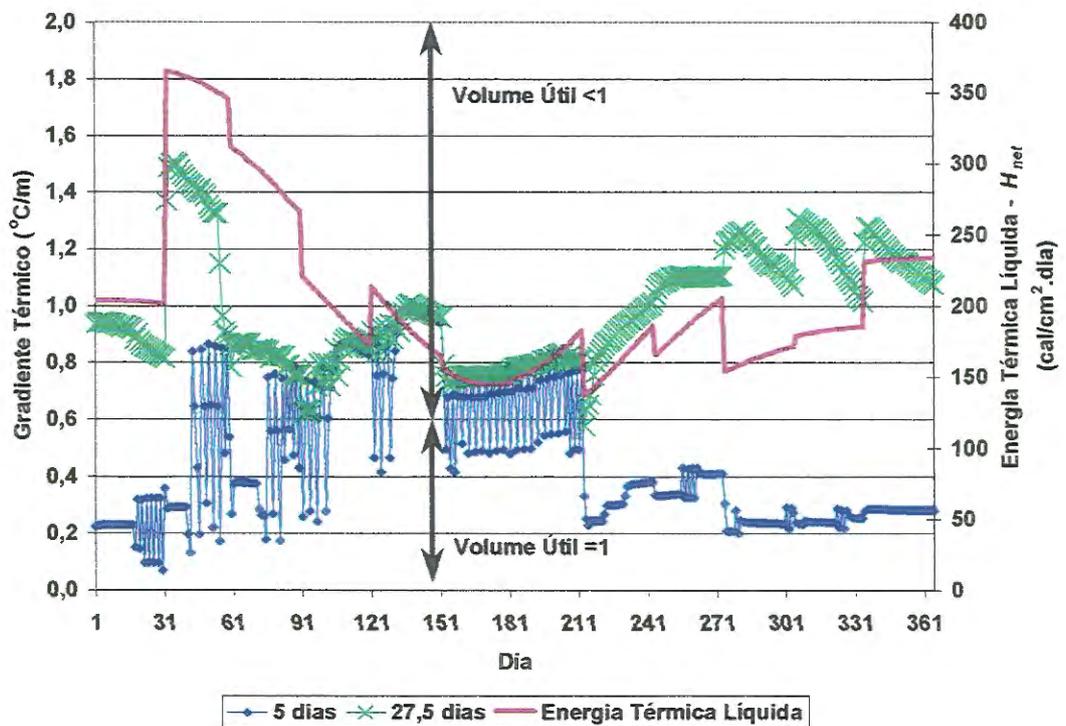
Analisando a FIGURA 4.24 observa-se que, a medida que se aumentava o tempo de detenção hidráulico médio, a forma da curva que representa a variação do gradiente térmico da lagoa assemelhava-se à forma da curva de representação da energia térmica líquida fornecida pelo ambiente.

Com o aumento do tempo de detenção hidráulico médio ocorreu a diminuição da vazão média afluente e, conseqüentemente, a diminuição da energia térmica introduzida na

lagoa, já que a temperatura do afluente mantinha o mesmo comportamento da vazão (altos valores durante o verão e valores menores durante o inverno).



(a)



(b)

FIGURA 4.24: Variação do gradiente térmico da lagoa de Campina Grande (PB) ao longo do ano

Fixado o gradiente de temperatura em $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ como limite para ocorrência da estratificação térmica, tem-se para gradientes de temperatura menores que este a condição de aproveitamento total do volume ($V_{\text{útil}} = 1$), enquanto que para gradientes de temperatura superiores ao fixado, tem-se o volume útil menor que o volume físico da lagoa ($V_{\text{útil}} < 1,0$).

As FIGURAS 4.24.a e 4.24.b permitem visualizar que, quanto menor o tempo médio de detenção hidráulico, maior o tempo em que o gradiente de temperatura da lagoa permanece na faixa de $0,0^{\circ}\text{C}/\text{m}$ a $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$, indicando um melhor aproveitamento da lagoa. Assim, admitindo-se o critério do gradiente de temperatura, com valor limite de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ como parâmetro de ocorrência da estratificação térmica, poder-se-ia afirmar, em primeiro momento, que, o volume útil da lagoa facultativa seria tão maior quanto menor fosse seu tempo de detenção hidráulico médio.

Esta observação está em concordância com PORTO (1991), que afirma que reservatórios com baixo tempo de detenção hidráulico são mais turbulentos e, portanto, menos sujeitos à formação da estratificação térmica.

O segundo conjunto de simulações foi feito para a região de Santa Fé do Sul (SP), considerando uma variação senoidal, defasada de 90° , (ou cossenoidal) anual da temperatura, compreendendo o intervalo de $21,5^{\circ}\text{C} \pm 3,5^{\circ}\text{C}$.

Uma função cossenoidal simulou a vazão afluente ao longo do ano, cujos valores utilizados foram $66\text{ m}^3/\text{h} \pm 33\text{ m}^3/\text{h}$, $44\text{ m}^3/\text{h} \pm 22\text{ m}^3/\text{h}$, $33\text{ m}^3/\text{h} \pm 16,5\text{ m}^3/\text{h}$ e $12\text{ m}^3/\text{h} \pm 6\text{ m}^3/\text{h}$, resultando em tempos médios de detenção hidráulica de 5; 7,5; 10 e 27,5 dias, respectivamente.

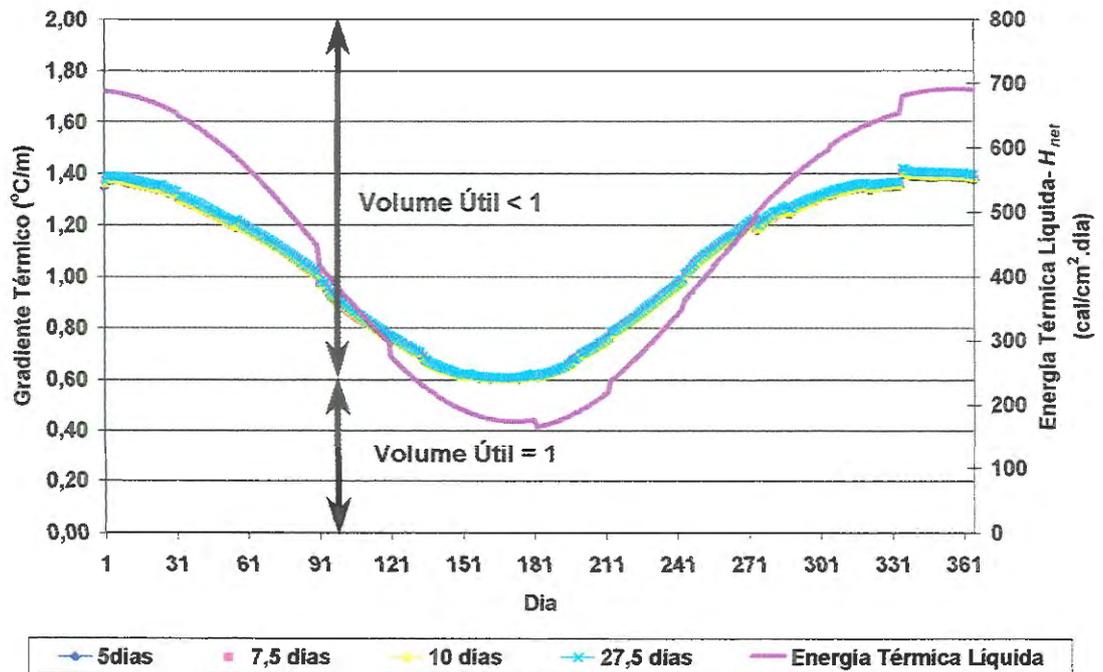


FIGURA 4.25: Variação do gradiente térmico da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) ao longo do ano.

A FIGURA 4.25 mostra o gráfico com a variação anual do gradiente de temperatura da lagoa, assim como a variação da energia térmica fornecida pelo ambiente para a região de Santa Fé do Sul (SP).

Ao analisar a FIGURA 4.25 observa-se que, mesmo variando o tempo médio de detenção hidráulica de 5 até 27,5 dias, a variação anual do gradiente de temperatura praticamente não sofreu alterações, mantendo-se sempre acima de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Além disso, a forma da curva de representação do gradiente de temperatura assemelha-se muito à forma da curva da energia térmica fornecida pelo ambiente.

Nesse momento, parece formar-se uma contradição: No primeiro conjunto de simulações, observou-se que, com a diminuição do tempo médio de detenção hidráulica da lagoa, menor seria o gradiente de temperatura e conseqüentemente maior o seu aproveitamento térmico; para o segundo conjunto de simulações, os resultados não mostraram nenhuma correlação entre o tempo médio de detenção hidráulica e a variação do gradiente de temperatura.

Essa ambigüidade permitiu inferir que deve haver uma relação entre a potência térmica fornecida pelo ambiente e a potência térmica introduzida pelo afluente, de tal forma que em algumas situações há um melhor aproveitamento do volume físico da lagoa facultativa.

Para verificar a influência do meio ambiente, calculou-se a variação da relação entre a potência térmica fornecida pelo ambiente (W_{AMBIENTE}) e a potência térmica introduzida pelo afluente (W_{AFLUENTE}), segundo as Equações (4.26) e (4.27) respectivamente.

$$W_{\text{AMBIENTE}} = 0,4845 \cdot H_{\text{Net}} \cdot A \quad (4.26)$$

sendo 0,4845 o fator de conversão de *cal* para *J*, *dia* para *segundo* e *cm²* para *m²*, H_{Net} a energia térmica líquida fornecida pelo ambiente ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$) e A a área superficial (m^2).

$$W_{\text{AFLUENTE}} = 2,7777 \cdot 10^{-4} \cdot Q \cdot \rho \cdot c \cdot T \quad (4.27)$$

sendo $2,7777 \cdot 10^{-4}$ o fator de conversão de hora para segundos, Q a vazão afluente ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), ρ a densidade do líquido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c o calor específico da água ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) e T a temperatura do afluente (°C).

As FIGURAS 4.26 e 4.27 apresentam os gráficos com a variação da relação ($W_{\text{AMBIENTE}}/W_{\text{AFLUENTE}}$) em função do tempo médio de detenção hidráulico e do dia do ano. Deve-se lembrar que, embora as temperaturas dos afluente sejam da mesma ordem de grandeza, os valores das vazões médias afluentes chegam a diferir de até 32,8 vezes.

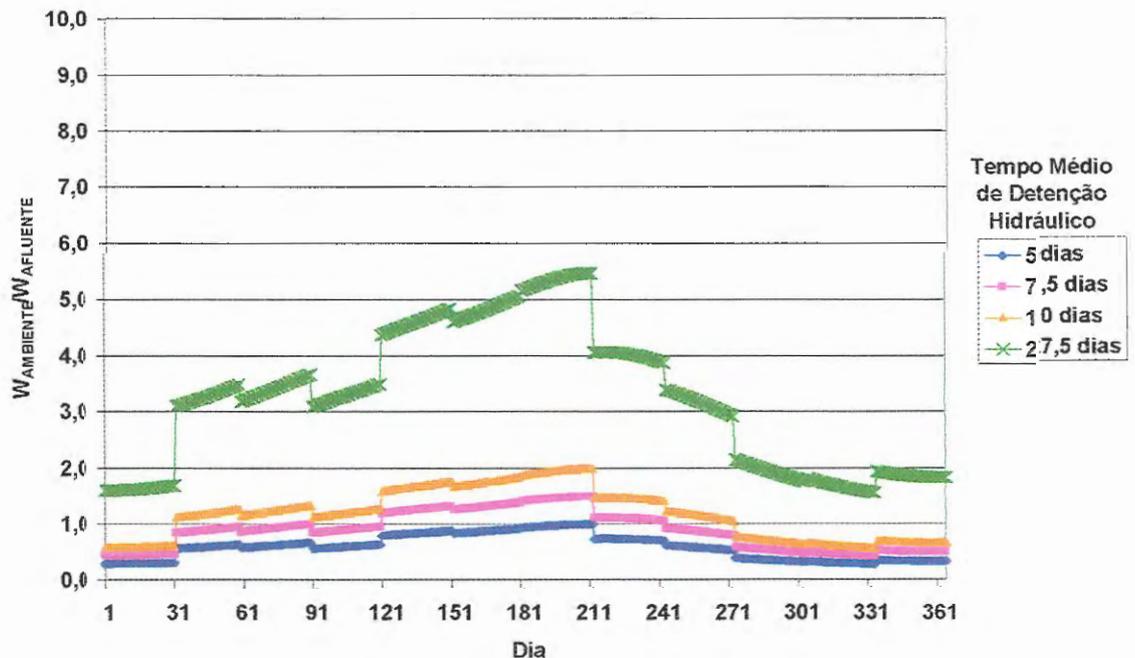


FIGURA 4.26: Variação da relação $W_{\text{AMBIENTE}}/W_{\text{AFLUENTE}}$ para a lagoa de Campina Grande (PB)

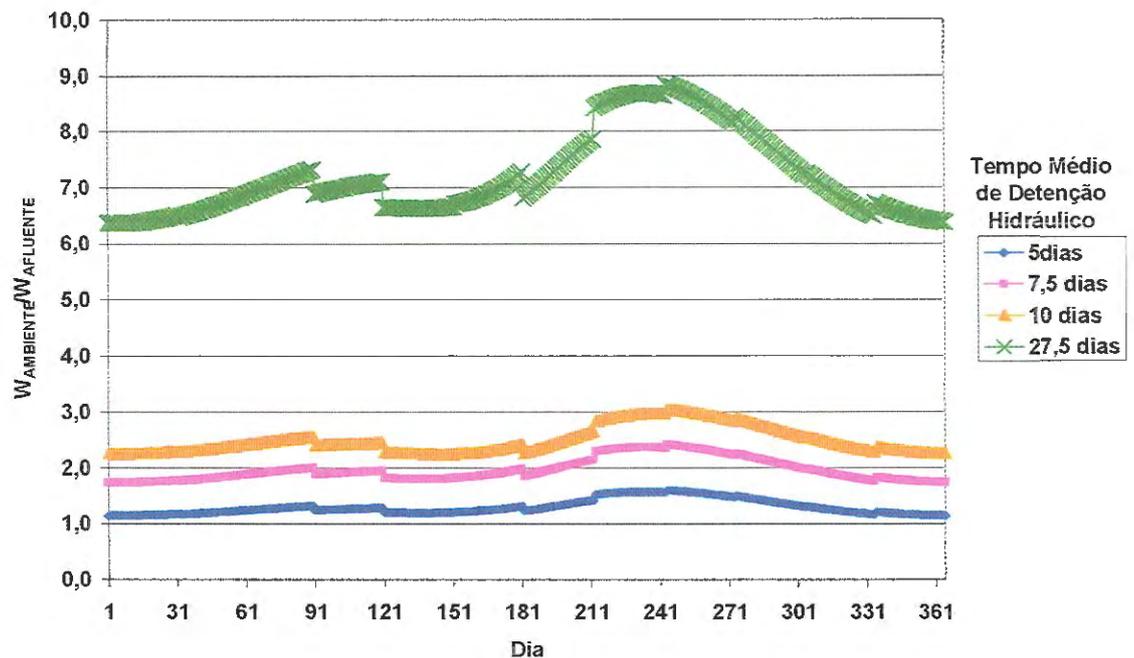


FIGURA 4.27: Variação da relação $W_{\text{AMBIENTE}}/W_{\text{AFLUENTE}}$ para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP)

Comparando-se a FIGURA 4.26 com a FIGURA 4.24 e, a FIGURA 4.27 com a FIGURA 4.25, conclui-se que, quanto mais próximo de zero for a relação $W_{\text{AMBIENTE}}/W_{\text{AFLUENTE}}$, melhor será o aproveitamento da lagoa; além disso, parece que a relação $\frac{W_{\text{AMBIENTE}}}{W_{\text{AFLUENTE}}} \leq 1$ conduz, do ponto de vista térmico, a um bom aproveitamento do volume físico das lagoas.

Outro fator importante que deve ser levado em conta, no que diz respeito à dinâmica da formação do perfil térmico, refere-se à localização do dispositivo de saída do efluente.

Fez-se então, algumas simulações numéricas na lagoa de Campina Grande (PB), variando apenas a profundidade do dispositivo de saída: 0,00m (original) 0,25m, 0,50m e 0,75m.

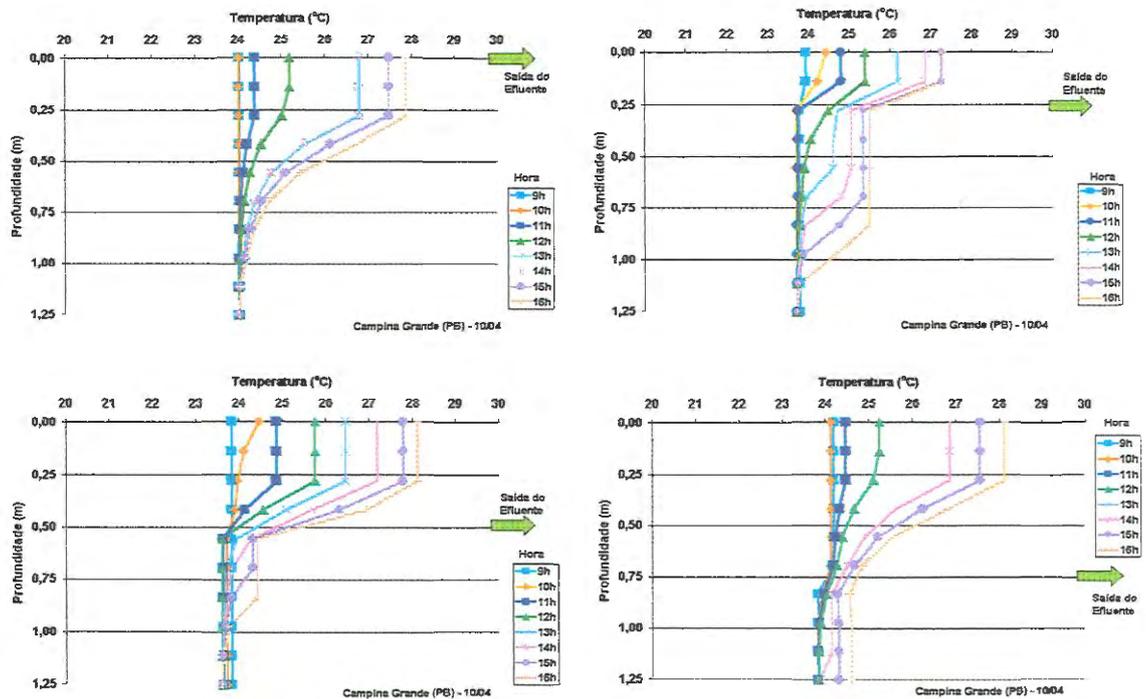


FIGURA 4.28: Formação dos perfis de temperatura na lagoa de Campina Grande(PB), em função do posicionamento do dispositivo de saída.

A FIGURA 4.28 mostra os gráficos referentes à formação dos perfis de temperatura na lagoa de Campina Grande (PB).

Ao analisar os perfis de temperatura da lagoa, quando o dispositivo de saída localizava-se junto à superfície, observa-se que a temperatura, para uma determinada hora, permanece constante até a profundidade de 0,30m, profundidade esta referente à profundidade do disco de Secchi.

Conforme mencionado no capítulo 3, a profundidade do disco de Secchi determina o limite inferior da zona eufótica, abaixo da ocorre grande atenuação da luz solar e, consequentemente, a diminuição da temperatura da água.

Pela simulação realizada para o dispositivo de saída localizado junto à superfície, observa-se que o início da região do metalimnio foi determinado, principalmente, pela profundidade do disco de Secchi (0,30m). Ao deslocar o dispositivo de saída do efluente para a profundidade de 0,25m, acima porém da profundidade do disco de Secchi, observou-se que o início da região do metalimnio situou-se na mesma profundidade em que se encontrava o dispositivo de saída. No entanto, quando o dispositivo de saída localizou-se abaixo da profundidade do disco de Secchi, o perfil de temperatura sofreu inflexão a partir dessa profundidade, conforme pode ser visualizado na FIGURA 4.28.

Dessa maneira pode-se dizer que o dispositivo de saída funciona como um dissipador de energia térmica.

Essa observação vem corroborar a prática experimental conduzida por TORRES et al. (1997). Conforme mencionado anteriormente, esses pesquisadores observaram que, não havendo condições físicas para que ocorresse a mistura do volume líquido, o volume ativo da lagoa estendia-se até a profundidade em que o dispositivo de saída estivesse localizado.

Como o volume ativo, ou volume útil, é determinado em função da termoclina e esta representa um divisor imaginário entre duas regiões termicamente diferentes, é de se esperar que, a medida que essa linha imaginária encontra-se mais próxima ao fundo, maior deva ser a temperatura média da lagoa, já que haverá um maior volume com temperaturas mais elevadas.

Para verificar essa ocorrência, calcularam-se as temperaturas médias diárias da lagoa de Campina Grande (PB) em função da profundidade do dispositivo de saída para o dia 10 de Abril, cujos resultados estão apresentados no gráfico da FIGURA 4.29.

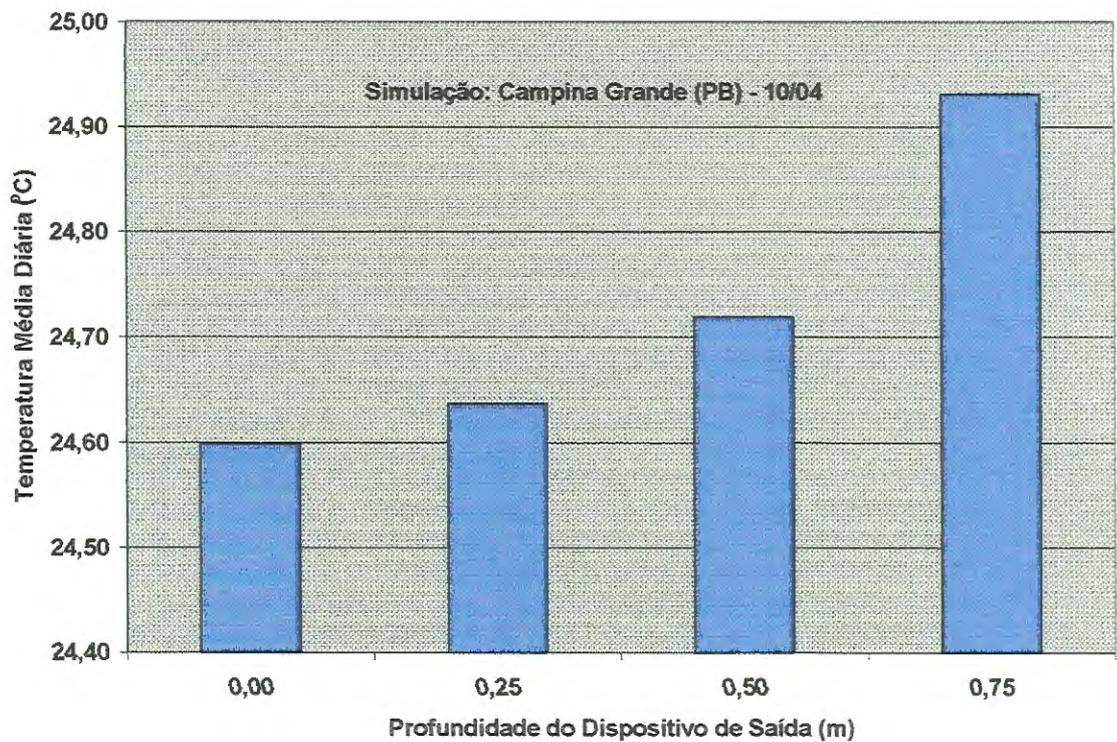


FIGURA 4.29: Variação da temperatura média diária da lagoa de Campina Grande (PB) em função da profundidade do dispositivo de saída.

Analisando a FIGURA 4.29 observou-se que a medida que o dispositivo de saída distanciava-se da superfície a temperatura média diária da lagoa aumentava.

Como o dispositivo de saída do efluente funciona como um dissipador de energia térmica proporcional à vazão e à temperatura da camada de retirada (ver eq. 4.27) e, como a temperatura do corpo líquido decresce da superfície em direção ao fundo da lagoa, a medida que se aprofunda o dispositivo de saída, para uma determinada vazão, ocorre a diminuição da energia térmica retirada pelo efluente. Esse fato proporciona um aumento na média diária da temperatura da lagoa, já que as camadas com temperaturas mais elevadas sofrerão menos turbulência.

Embora as diferenças observadas entre as temperaturas médias diárias da lagoa de Campina Grande (PB) para as profundidades de 0,00m, 0,25m, 0,50m e 0,75m sejam pequenas, deve-se observar que, do ponto de vista térmico, quanto mais profundo estivesse localizado o dispositivo de saída maior seria o volume disponível com temperatura mais elevada. No entanto, segundo SARIKAYA et al. (1987) a taxa média de decaimento bacteriano é inversamente proporcional à profundidade. Isso leva a crer que utilizando-se dispositivos de saída localizados próximo ao fundo da lagoa pode-se, retirar um efluente com qualidade sanitária não muito adequada. Além disso, PEARSON & KONIG (1986) mencionam que em lagoas facultativas, o número de coliformes fecais é pequeno próximo à superfície, verificando-se um aumento logo abaixo da camada de algas.

4.3.4 – Avaliação dos Indicadores de Estratificação Térmica

No capítulo 3 foram apresentados três indicadores de estratificação térmica: Número de Froude, Número Pond e Número MIX.

Com o objetivo de avaliar o comportamento desses adimensionais durante o processo de estratificação/desestratificação, calculou-se o valor desses indicadores ao longo do dia, tanto para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP) quanto para a lagoa de Campina Grande (PB), FIGURAS 4.30 e 4.31 respectivamente.

Para facilitar a comparação dos resultados dos indicadores de estratificação térmica com os perfis de temperatura ao longo da profundidade apresentados nos itens 4.3.1 e 4.3.2, as simulações foram feitas para o dia 5 de março para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP) e, para o dia 6 de julho para a lagoa de Campina Grande (PB).

A FIGURA 4.30 mostra a variação horária dos indicadores de estratificação térmica ao longo do dia 5 de março para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP).

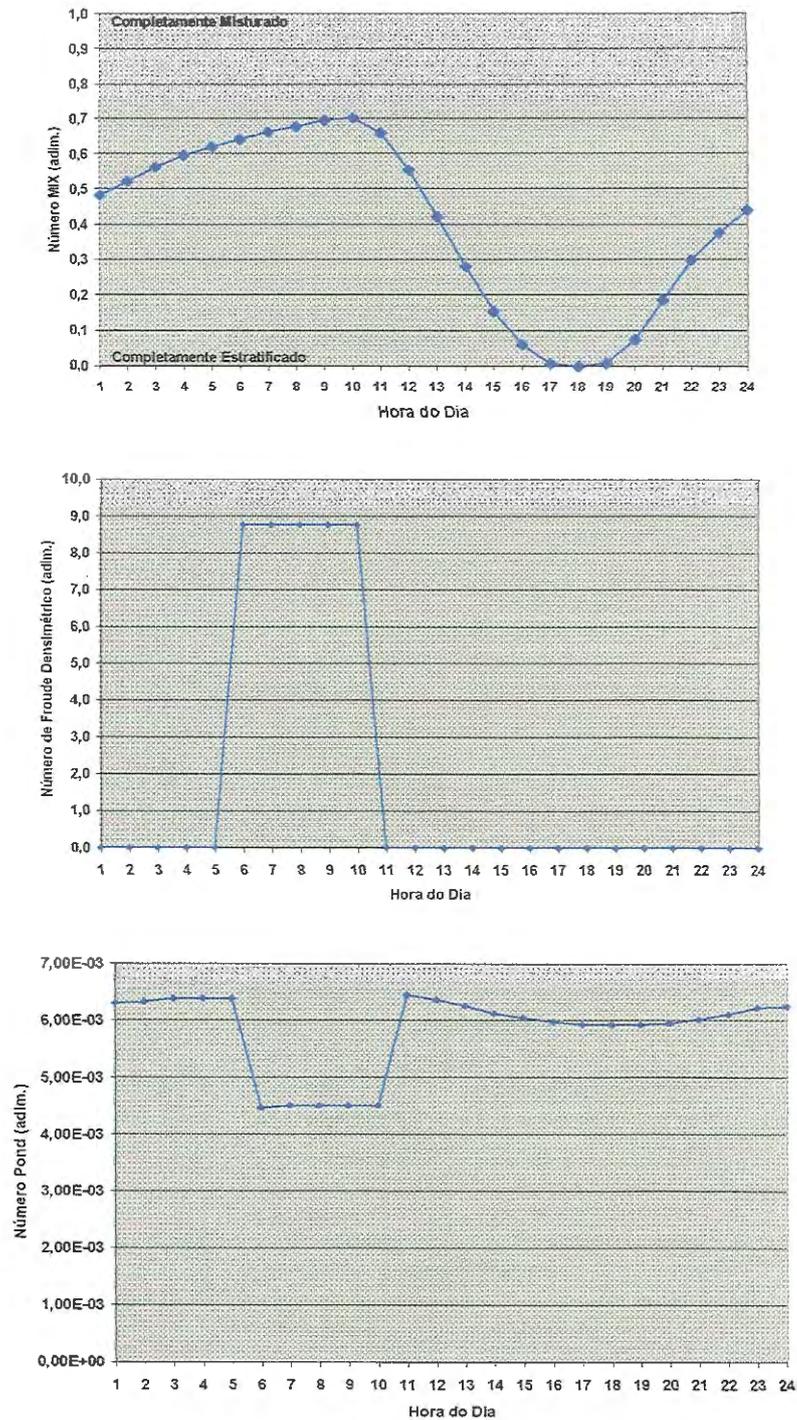


FIGURA 4.30: Variação horária do número MIX, do número de Froude Densimétrico e do número *Pond* para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP) no dia 5 de março.

Analisando a FIGURA 4.30 em conjunto com os perfis de temperatura apresentados na FIGURA 4.17 é possível verificar que as 10 horas, quando o perfil de temperatura atinge seu menor gradiente térmico, há uma significativa alteração do comportamento dos indicadores de estratificação térmica. O adimensional MIX atinge nesse momento, seu maior

valor, sendo que o menor valor foi observado para as 18 horas, indicando que a lagoa estava completamente estratificada. Comparando esse dado com a FIGURA 4.17 observa-se que durante o período das 14 às 18h, ocorreram os maiores gradientes térmicos, embora o máximo gradiente tenha sido verificado para as 16h e não as 18h como indica o número MIX.

O gráfico da variação do número de Froude apresentado na FIGURA 4.30 mostra a formação de um patamar entre as 6 e as 10 horas, indicando um período em que se verifica os menores gradientes térmicos.

A brusca variação no número de Froude observada entre as 5 e 6 deve-se ao fato da diminuição da diferença de densidade da água entre as camadas superficial e profunda, atingindo valores muito próximos de zero, fazendo com que a relação adimensional representada pela eq. (3.30) tendesse a valores elevados. Já entre as 10 e 11 horas, com o aumento da diferença de densidade entre as camadas superficial e profunda, ocorreu um aumento significativo do denominador da eq.(3.30) resultando em valores adimensionais muito próximos de zero.

O cálculo do número Pond ao longo do dia, resultou em valores muito próximos de zero. Vale lembrar que, de acordo com JIRKA et al. (1979), se $P < 0,3$ a lagoa deve estar bem estratificada, se $0,3 \leq P \leq 1,0$ a lagoa está parcialmente estratificada e, se $P > 1$ a lagoa está verticalmente misturada.

Comparando a variação horária do número Pond (FIGURA 4.30) com os perfis de temperatura (FIGURA 4.17) percebe-se que, embora o Número Pond tenha resultado os menores valores para o período das 6 às 10 horas, o perfil de temperatura manteve-se praticamente constante durante esse mesmo período. Essa observação fica em desacordo com o proposto por JIRKA et al. (1979) que mencionaram que, quanto menor o valor de P , maior será o grau de estratificação térmica.

A FIGURA 4.31 mostra a variação horária dos indicadores de estratificação térmica ao longo do dia 6 de julho para a lagoa de Campina Grande (PB).

Nesse caso, o número MIX manteve-se durante as 24 horas do dia em valores muito próximo de 0,9, indicando que a lagoa permaneceu quase que totalmente misturada. É interessante observar que, embora a lagoa de Campina Grande (PB) tenha apresentado um gradiente térmico de $3,2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ às 14 horas, mostrando claramente a ocorrência da estratificação térmica, o número MIX não refletiu essa variação.

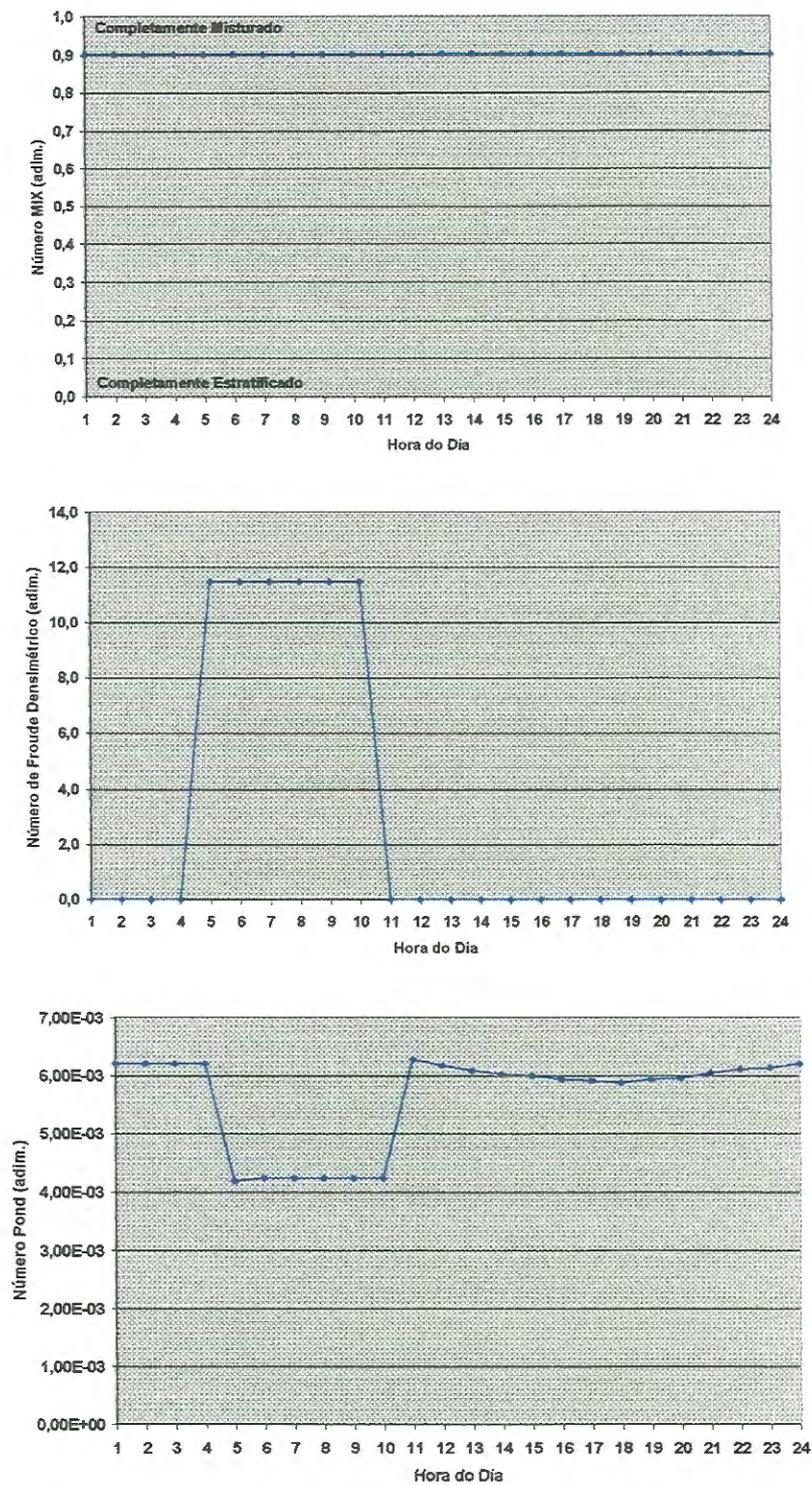


FIGURA 4.31: Variação horária do número MIX, do número de Froude Dimensional e do número *Pond* para a lagoa de Campina Grande (PB) no dia 6 de julho.

Com relação ao número de Froude verificou-se que, durante o período das 5 até 10 horas, o gradiente de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio atingiram valores muito

próximos de zero, produzindo, então, uma elevação do número de Froude (ver eq. 3.30). Comparando a variação horária do número de Froude (FIGURA 4.31) com os perfis de temperatura (FIGURA 4.12) é possível observar que os maiores valores do número de Froude ocorreram quando a temperatura na lagoa de Campina Grande (PB) era praticamente constante ao longo da profundidade.

A variação do número POND ao longo do dia (ver FIGURA 4.31) ficou muito próxima de zero, indicando um comportamento semelhante ao observado na lagoa de Santa Fé do Sul (SP).

Analisando os resultados dos indicadores de estratificação térmica apresentados nas FIGURAS 4.30 e 4.31, é possível fazer algumas observações quanto à sua aplicabilidade.

O número POND foi desenvolvido para lagoas de resfriamento, onde as temperaturas são mais elevadas e a diferença de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio são mais acentuadas. Essa observação leva a crer que os coeficientes de expansão térmica (β) das lagoas de resfriamento são muito menores que aqueles observados em lagoas de estabilização, resultando da sua aplicação às lagoas de estabilização, valores muito discrepantes.

O número MIX praticamente não variou ao longo do dia para a lagoa de Campina Grande (PB), mesmo esta apresentando gradientes térmicos variando de $0,0^{\circ}\text{C}/\text{m}$ a $3,2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ para o mesmo período; já para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP), o número MIX apresentou grande variação ao longo do dia, quando o gradiente térmico da lagoa variou de $0,0^{\circ}\text{C}/\text{m}$ a $5,0^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

O número de Froude mostrou-se um bom indicador da estratificação térmica ao longo do dia, tanto para a simulação da lagoa de Campina Grande (PB) quanto para a simulação da lagoa de Santa Fé do Sul (SP). Vale ressaltar que os valores estabelecidos por ORLOB (1983), como referência para a ocorrência da estratificação térmica em lagos e reservatórios, não foram observados. Segundo RUOCHUAN³⁰ não há valores limites pré-definidos para verificação da ocorrência de estratificação térmica (ver seção 3.6.1).

4.3.5 – Avaliação do Tempo de Processamento

A fim de avaliar o tempo necessário para o processamento dos dados, fez-se várias simulações computacionais alterando o número de dias utilizados para simulação.

³⁰ RUOCHUAN, G. (1998). Information to USP-EESC. (informação pessoa) GU@ccelab.iastate.edu

As simulações foram feitas em três tipos de computadores: 486DX 40MHz, PENTIUM 133MHz e PENTIUM III 450MHz.

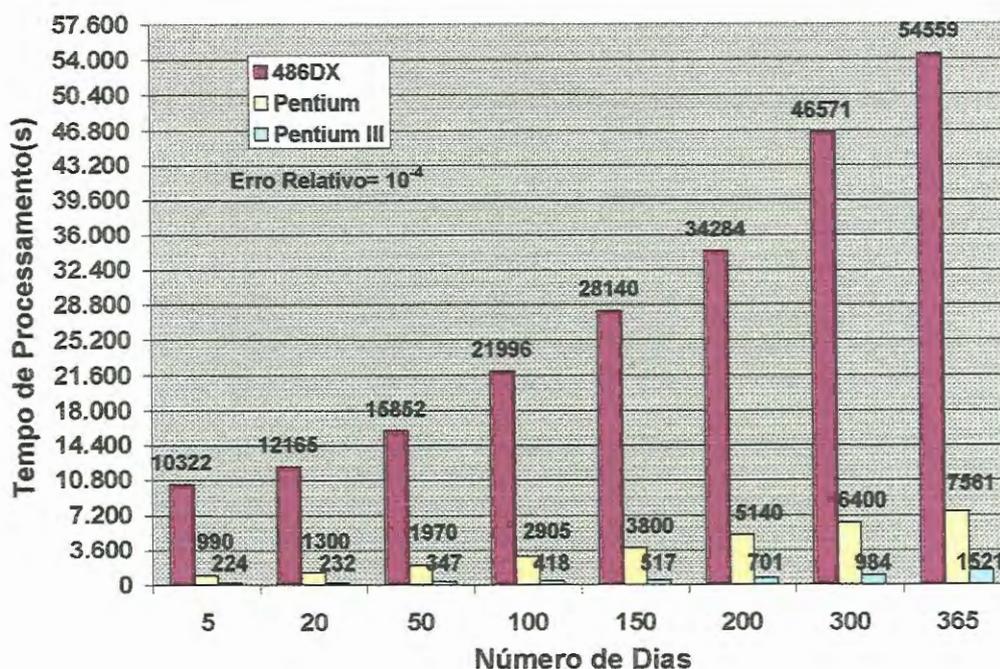


FIGURA 4.32: Variação do Tempo de Processamento em relação ao computador utilizado.

NOTA: Dados obtidos a partir de simulações feitas para Santa Fé do Sul, empregando método de Heun ($h=1$ hora) e, Erro Relativo Máximo de 10^{-4} .

A FIGURA 4.32 mostra o resultado de um conjunto de simulações realizadas, sendo aqui apresentada apenas como ilustração da variação do tempo de processamento em função do tipo de computador utilizado.

Nas simulações realizadas, a execução do modelo computacional, desenvolvido em linguagem *VisualBasic*, no computador com processador PENTIUM III 450MHz, mostrou-se ser aproximadamente 6 vezes mais rápido que o computador com processador PENTIUM 133MHz e até 50 vezes mais rápido que o computador com processador 486 DX 40 MHz.

O tempo de processamento é função de muitas variáveis, podendo-se citar: número de dias de simulação, erro relativo máximo, número de pontos na vertical, duração da estratificação térmica, profundidade do dispositivo de saída, método numérico para resolução das equações diferenciais e tamanho do passo utilizado.

De um modo geral, o tempo de processamento pode ser estimado a partir da Equação (4.28):

$$TP = k_p \cdot \left[\left(ND \cdot \frac{NPV}{10} \cdot \frac{1}{\Delta t} \right) + \frac{0,7463}{\varepsilon^{0,5574}} \right] \quad (4.28)$$

onde TP é o tempo de processamento (s), ND é o número de dias da simulação, NPV é o número de pontos na vertical (adim.), h é o passo considerado (horas), ε é o máximo erro relativo (dec.) e k_p a constante que depende do processador que está sendo utilizado, sendo 1,7 para PENTIUM III 450MHz, 7,5 para PENTIUM 133MHz e 85,0 para 486DX 40MHz.

Em função do tamanho da memória RAM (*Random-Access Memory*) do computador, da capacidade de armazenamento do disco rígido, assim como de sua fragmentação e do espaço livre, o tempo estimado para a simulação pode diferir do valor obtido da eq. (4.28).

4.3.6 – Análise de Sensibilidade do Modelo Térmico

O modelo térmico desenvolvido utiliza muitas variáveis para a realização do cálculo do perfil de temperatura.

A fim de avaliar a importância de algumas dessas variáveis, procedeu-se a análise de sensibilidade do modelo.

As variáveis consideradas na análise referem-se àquelas que devem ser informadas pelo usuário.

A análise de sensibilidade consistiu em variar cada uma dessas variáveis de entrada de $\pm 100\%$, $\pm 50\%$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ e observar a alteração provocada nos perfis de temperatura ao longo do ano, comparando os resultados com aqueles obtidos com as variáveis corretas. Vale mencionar que a variação de -100% dos dados de entrada, foi proposta para avaliar a possibilidade de se desprezar essa variável.

A metodologia aplicada consistiu, basicamente, em comparar o perfil vertical de temperatura da condição real com o perfil vertical de temperatura resultante da alteração de uma das variáveis.

Como os perfis horários de temperatura eram constituídos de dez pontos calculados, foi necessário encontrar um valor característico para cada uma das situações. Esse valor foi determinado multiplicando-se a temperatura de um determinado elemento pela distância entre o centro de massa desse elemento e o fundo da lagoa; esse produto foi denominado *momento de temperatura*, em analogia ao momento de massa.

Como a temperatura junto ao fundo da lagoa sofre menor variação em relação a temperatura das camadas mais próximas à superfície, a adoção do fundo da lagoa como referência para obter a distância até o centro de massa do elemento, pareceu ser um bom fator ponderador.

Para avaliar o grau de importância de cada uma das variáveis analisadas, comparou-se os valores que formavam o conjunto de momentos de temperatura da variável original com os da variável modificada, calculando-se o coeficiente de correlação linear (R^2) e a inclinação da reta de ajuste (α).

Dessa maneira, calculou-se o momento de temperatura para a condição real e para a situação com a variável modificada e, em seguida, o coeficiente de correlação linear (eq. 4.29) e o ângulo de inclinação da linha de correlação (eq. 4.30).

$$R^2 = \left\{ \frac{n \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \right\}^2 \quad (4.29)$$

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.30)$$

sendo n o número de pontos do conjunto de dados, x_i o *momento de temperatura* da condição original ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$); y_i o *momento de temperatura* da situação com uma das variáveis modificada ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$).

Admitindo-se uma diferença percentual máxima (ξ) entre os valores de x e y , tem-se:

- Com relação ao fator de correlação linear:

$$R^2 = \left\{ \frac{n \cdot (\sum x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{\left[n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum y^2 - (\sum y)^2 \right]}} \right\}^2$$

Como $y = \xi \cdot x$, tem-se:

$$R^2 = \left\{ \frac{n \cdot (\sum x \cdot (\xi \cdot x)) - (\sum x) \cdot (\sum \xi \cdot x)}{\sqrt{[n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2] \cdot [n \cdot \sum (\xi \cdot x)^2 - (\sum \xi \cdot x)^2]}} \right\}^2 = \left\{ \frac{\xi \cdot [n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2]}{\sqrt{\xi^2 \cdot [n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2]}} \right\}^2$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\xi \cdot [n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2]}{\xi \cdot [n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2]} \right\}^2 = \{1\}^2 = 1$$

o que mostra que o coeficiente de correlação linear (R^2) independe da diferença percentual existente entre os dois conjuntos de dados x e y .

- Com relação ao ângulo de inclinação:

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Como $y = \xi \cdot x$, tem-se:

$$\alpha = \frac{n \cdot \sum x \cdot (\xi \cdot x) - (\sum x) \cdot (\sum \xi \cdot x)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} = \frac{n \cdot \xi \cdot \sum x^2 - \xi (\sum x)^2}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$\alpha = \xi \cdot \left[\frac{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \right] \Rightarrow \therefore \alpha = \xi$$

o que mostra que o ângulo de inclinação (α) é igual a própria diferença percentual definida.

Admitindo-se uma diferença percentual máxima (ξ) de 5%, pode-se dizer que uma variável tem pouca influência sobre o resultado do perfil de temperatura quando, $0,95 \leq \alpha \leq 1,05$ e $R^2 \approx 1,0$.

As variáveis analisadas foram agrupadas em cinco categorias: Propriedades, Dados Climáticos, Características Físicas da Lagoa, Características do Afluentes e Localização Geográfica e classificadas quanto à sensibilidade em Sensíveis e Não-Sensíveis, conforme apresentado na TABELA 4.1.

Dentro do grupo **Propriedades**, as variáveis *profundidade do disco de Secchi* e a definição da condição de contorno, através da *equação de temperatura da superfície da água*, mostraram-se mais sensíveis que as demais do grupo, já que pequenas mudanças no valor dessas variáveis proporcionaram grandes alterações nos perfis de temperatura.

A variável *profundidade da zona fótica* mostrou-se sensível apenas quando sua posição simulada localizava-se acima da *profundidade do disco de Secchi*. De acordo com

ESTEVES (1988), a profundidade da zona fótica, em lagos, é aproximadamente 3 vezes a profundidade do disco de Secchi. Como fisicamente não é possível ter $D_{ZF} < D_{DS}$ pode-se observar que, para o cálculo do perfil de temperatura, a sensibilidade da variável *profundidade da zona fótica* está limitada pela variável *profundidade do disco de Secchi*.

Em relação ao conjunto **Dados Climáticos**, as variáveis *cobertura do céu por nuvens* e *temperatura do ar* foram as mais sensíveis, o que mostra ser de fundamental importância obter-se medidas mensais a partir de uma longa série de dados.

No grupo **Características Físicas da Lagoa**, a variável *profundidade* mostrou-se muito sensível, o que era esperado, já que o modelo considera a propagação da energia térmica apenas na vertical. As variáveis *largura* e *comprimento* devem exercer influência sobre os resultados dos perfis de temperatura, a medida que o tempo de detenção hidráulico da lagoa atinge valores próximos a 3 dias.

A *profundidade da tubulação efluente* mostrou-se muito sensível, o que também já era esperado, conforme comentado ao final do item 4.3.3.

Para as variáveis *vazão afluente* e *temperatura do afluente*, do conjunto **Características do Afluente**, ocorreu um fato inesperado: nenhuma das duas variáveis mostraram-se sensíveis, ou seja, a alteração de seus valores não proporcionaram alterações significativas nos perfis de temperatura. Essa constatação deve ser tomada com ressalvas, pois acredita-se que, dependendo da magnitude, essas variáveis podem influenciar significativamente os perfis de temperatura, uma vez que parece haver uma relação entre a potência térmica fornecida pelo ambiente e a potência térmica introduzida pelo afluente influenciando a ocorrência de estratificação térmica.

Com relação as variáveis do grupo **Localização Geográfica**, a altitude nada influenciou o cálculo dos perfis de temperatura. Como já era esperado, a latitude e a longitude do local de implantação da lagoa, mostraram-se muito sensíveis a variações de até 5% de seus valores originais. MENDES et al. (1995) analisando cinco lagoas de estabilização situadas em Portugal, concluíram que a localização geográfica das lagoas pode influenciar a determinação das constantes de redução da DBO_5 .

TABELA 4.1 : Análise de Sensibilidade do Modelo de Estratificação Térmica

Variável Analisada		Diferença Percentual da Variável Analisada										
		-100%	-50%	-20%	-10%	-5%	+5%	+10%	+20%	+50%	+100%	
Propriedades	D_{sd}	Profundidade do Disco de Sech	●●●	●●●	●●●	●	●	●	●	●●●	●●●	●●●
	D_{ZF}	Profundidade da Zona Fótica	●●●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ez	Coefficiente de Difusão Vertical	●●●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	T_s	Temperatura Superficial da Água	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●	●●●	●●●	●●●	●●●
Dados Climáticos	C	Cobertura do Céu por Nuvens	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●	●●●	●●●	●●●	●●●
	V	Velocidade do Vento	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	$UmRel$	Umidade Relativa do Ar	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Tar	Temperatura do Ar	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
Características Físicas da Lagoa	L	Comprimento	n.c.	●●●	●	●	●	●	●	●	●	●
	W	Largura	n.c.	●●●	●	●	●	●	●	●	●	●
	H	Profundidade	n.c.	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
	Za	Prof. da Tubulação Afluente	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	●	●	●	●	●
	Ze	Prof. da Tubulação Efluente	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
Característica do Afluente	Qa	Vazão afluente	n.c.	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ta	Temperatura do Afluente	n.c.	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Localização Geográfica	ϕ	Latitude	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
	ψ	Longitude	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
	Z	Altitude	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Nota: ●●● : Variável Sensível; ● Variável Insensível; n.c.: Não Calculado

5

A INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NO TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICO

Nas lagoas de estabilização, assim como em várias outras unidades, a eficiência de tratamento está intimamente relacionada com o tempo de detenção hidráulico.

A eficiência do tratamento nas lagoas de estabilização é função do transporte hidráulico assim como dos processos químicos e biológicos que ocorrem em seu interior (FERRARA & HARLEMAN, 1981).

O dimensionamento das lagoas de estabilização pode ser feito empregando-se modelos baseado nas condições de mistura completa, escoamento pistonado (*plug flow*) ou escoamento disperso, todos dependentes do tempo de detenção hidráulico. O equacionamento baseado nas condições de mistura completa e escoamento pistonado é considerado situação ideal, não sendo comumente observado na prática (THIRUMURTHI, 1969; KAWAI et al., 1981; YANES, 1986; POLPRASERT & AGARWALLA, 1994), isto porque a dispersão causada pela variação da vazão afluyente, o vento, o atrito do líquido com as paredes da lagoa, faz com que parte da água da lagoa saia em um tempo menor que o tempo de detenção hidráulico teórico, e parte do líquido da lagoa deixe-a posteriormente (THACKSTON et al., 1987).

Segundo CHU & SOONG (1997) a estratificação térmica pode influenciar significativamente o transporte vertical de calor e massa.

De acordo com NAMÉCHE & VASSEL (1996) a estratificação térmica, assim como a geometria das lagoas são fatores que afetam o comportamento hidráulico dessas unidades.

A literatura está repleta de relatos sobre a influência do vento nas condições de mistura das lagoas de estabilização, assim como na formação do perfil térmico, dentre os quais pode-se citar: SILVA & MARA (1979), ARCEIVALA (1983), VIDAL (1983), VANZO (1990) e CHU & SOONG (1997). Nas lagoas de estabilização, o vento exerce

grande influência no comportamento hidráulico, uma vez que afeta as condições de mistura da massa líquida e a velocidade de escoamento superficial do líquido.

Devido a diferença de temperatura e/ou salinidade entre as camadas líquidas das lagoas, as camadas mais leves tendem a sobrepôr as mais densas criando condição de estratificação. Como o vento sopra sobre a superfície da água, as camadas superficiais do corpo d'água são misturadas graças aos efeitos cisalhante e de mergulho que o vento exerce sobre o líquido. No decorrer do tempo, as camadas mais densas do líquido e menos turbulentas vão misturando-se com as camadas menos densas (CHU & SOONG, 1997).

A FIGURA 5.1 mostra um desenho esquemático da mistura provocada pelo vento em um reservatório estratificado.

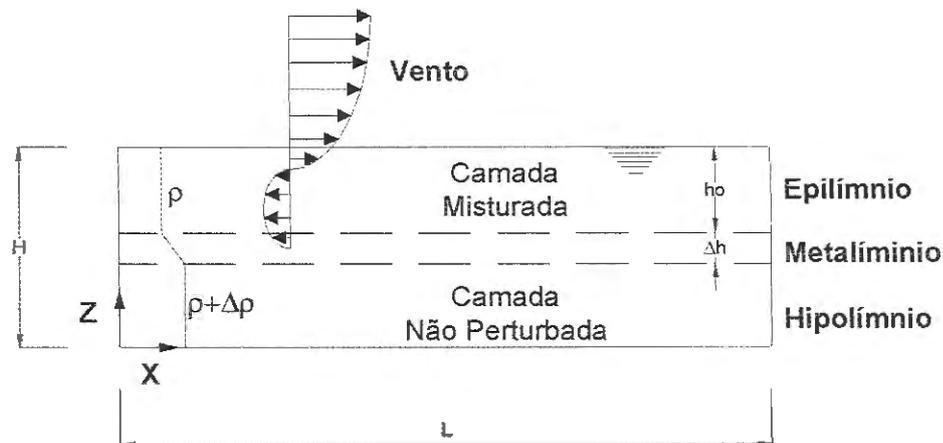


FIGURA 5.1: Desenho esquemático do vento induzindo a mistura em um reservatório

Fonte: Adaptado de CHU & SOONG (1997)

TOMPSON & IMBERGER (1980) e SPIEGEL & IMBERG (1980) sugeriram que a relação entre o comprimento do reservatório e a altura do epilímnio $\left(\frac{L}{h_0}\right)$ mantém estreita relação com a ocorrência da estratificação térmica.

ORAGUI et al. (1995) estudando a remoção de organismos patogênicos em lagoas de estabilização observaram que para a pequena relação entre a área superficial e a profundidade da lagoa, a eficiência do tratamento pode ser influenciada por um significativo curto-circuito hidráulico. Conclusão semelhante também chegaram AGUNWAMBA et al. (1992) alguns anos antes, quando relataram que com a diminuição da relação largura e profundidade $\left(\frac{W}{H}\right)$ a influência de escoamentos secundários nas lagoas de estabilização

aumentava. Segundo TACKSTON et al. (1987), com o aumento da profundidade, para uma determinada largura, há a tendência de aumento da fração do volume de zonas mortas.

Essas conclusões mostram a importância do comprimento da lagoa (L), da largura (W) e, da profundidade (H) – caso a lagoa não esteja estratificada – ou da altura da camada referente ao epilímnio (h_e) – caso a lagoa esteja estratificada – no comportamento hidráulico e, conseqüentemente na eficiência do tratamento realizado nas lagoas de estabilização.

Conforme mencionado no Capítulo 3, as vazões de saída geram correntes de circulação e, dependendo de sua magnitude, podem alterar as condições de mistura da lagoa devido a turbulência a elas associadas. Segundo FORERO (1986) a medida que aumenta-se a largura das lagoas, diminui-se a influência dos dispositivos de saída sobre efeito dessas correntes de circulação, já que há a diminuição da velocidade média de escoamento e este passa a ter comportamento laminar. Alguns anos antes, HUBER et al. (1972) sugeriram a utilização de uma equação para determinar a espessura da zona de retirada de água de reservatórios, cuja formulação é diretamente proporcional a relação entre a vazão efluente e a largura do reservatório.

Nas lagoas de estabilização os dispositivos de saída localizam-se próximo à superfície garantindo assim uma melhor qualidade sanitária do efluente, conforme sugerido por PEARSON & KONIG (1986), SARIKAYA et al. (1987) e PEARSON et al. (1995), entre outros.

Nas lagoas de estabilização, a zona afetada pelas correntes de circulação dependem da estabilidade da estratificação, da magnitude da vazão e da geometria da lagoa, conforme mencionado anteriormente.

Em lagoas completamente misturadas, o fluxo que se encaminha para a saída deve ser radial, tomando água, igualmente, de todas as direções. No caso de lagoas estratificadas, como os dispositivos de saída localizam-se na região do epilímnio e, por serem as vazões efluentes pequenas em relação ao volume total da lagoa, o fluxo vem de vários pontos do epilímnio. Portanto, a região de tomada de água é aquela determinada pelo volume útil da lagoa, o qual influencia diretamente o tempo de detenção hidráulico da lagoa e a ocorrência de curtos-circuitos.

Segundo TEIXEIRA (1995) e TACKSTON et al. (1987), o termo curto-circuito não tem uma definição técnica precisa, mas é geralmente usado para descrever situações nas quais os caminhos percorridos por partículas do líquido resultam em tempos de residência na lagoa (ou no reator) inferiores ao tempo de detenção hidráulico teórico.



No interior das lagoas de estabilização, assim como em outros reatores, pode ocorrer a formação de três regiões distintas entre si, denominadas: zona advectiva, zona morta e zona de mistura.

As *Zonas Mortas* representam as regiões em que os tempos de permanência de partículas do líquido no seu interior são, em média, relativamente altos, quando comparados ao valor do tempo teórico de detenção hidráulico (TEIXEIRA, 1995).

A principal diferença entre a zona morta e a zona de mistura, é a velocidade de troca do líquido entre a referida zona e a zona advectiva. A zona morta apresenta uma taxa de troca muito menor se comparada com a região de mistura (TACKSTON et al., 1987).

A FIGURA 5.2 ilustra a formação das *Zonas Morta, de Mistura e Advectiva*.

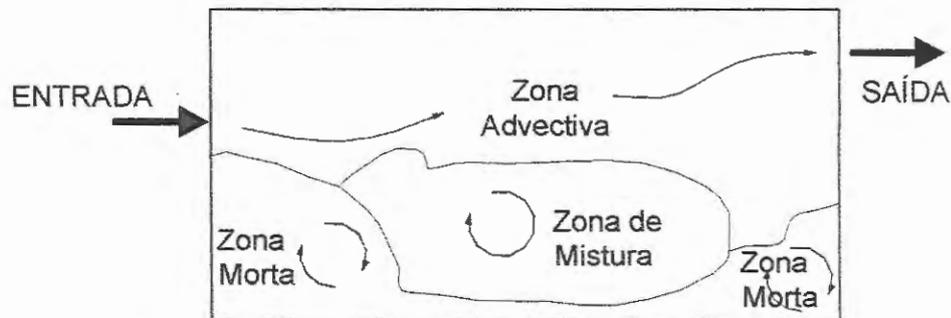


FIGURA 5.2: Representação das zonas morta, advectiva e de mistura
Fonte: Adaptado de TACKSTON et al. (1987).

Segundo TACKSTON et al. (1987), as zonas mortas não fazem parte do volume pelo qual o líquido escoar; dessa maneira, o volume efetivo da lagoa é menor que o volume total e o tempo de detenção hidráulico real é menor que o tempo de detenção hidráulico teórico, ocorrendo então os chamados *curtos-circuitos*.

As zonas mortas podem ser formadas por material sedimentado no fundo da lagoa formando bancos de lodo, assim como por regiões da massa líquida, principalmente do hipolimnio, quando estagnadas devido a ocorrência de estratificação térmica duradoura.

De acordo com VANZO (1990), quando ocorre a estratificação térmica nas lagoas de estabilização, a massa de água contida no hipolimnio funciona como sendo o fundo da lagoa, diminuindo então o volume efetivamente utilizado para o escoamento do líquido da lagoa tornando, conseqüentemente, o tempo de detenção hidráulico real menor que o tempo de detenção hidráulico teórico.

Segundo FORERO (s.d.) para lagoas com $Re < 2000$, é de se esperar que o tempo de detenção hidráulico médio seja aproximadamente 0,66 do tempo de detenção hidráulico real, devido à velocidade das camadas líquidas superiores ser 1,50 vez maior que a

velocidade média do escoamento. No entanto, em outro artigo, esse pesquisador relatou que na prática, o tempo de detenção hidráulico de lagoas de estabilização pode variar de 30% a 80% do tempo de detenção hidráulico teórico (FORERO, 1987). Vale ressaltar que Forero relacionou esse comportamento à velocidade superficial de escoamento sem, no entanto, considerar as possíveis causas para essa mudança.

Dessa maneira, a partir da conceituação do volume útil da lagoa e da variação observada ao longo do dia, apresentadas no Capítulo 4, é possível fazer, do ponto de vista térmico, uma analogia à FIGURA 5.2, considerando apenas a estratificação na formação de zonas morta, de mistura e advectiva, conforme apresentado na FIGURA 5.3.



FIGURA 5.3: Formação de zonas morta, de mistura e advectiva a partir do volume útil da lagoa

Segundo a proposta apresentada na FIGURA 5.3 tem-se a zona advectiva formada pelo volume útil da lagoa quando o Sol está acima do horizonte. Com o Sol abaixo do horizonte pode haver um aumento do volume útil; assim o volume que excede aquele determinado pela zona advectiva forma a zona de mistura. A zona morta fica determinada como sendo a região que permanece termicamente inalterada ao longo das 24 horas do dia. Dessa maneira, o volume útil da lagoa, compreendido pelas zonas advectiva e de mistura, deve influenciar o tempo de detenção hidráulico da lagoa ao longo do dia.

O tempo de detenção hidráulico real e a dispersão que ocorrem em uma lagoa são usualmente determinados experimentalmente aplicando-se o teste dos traçadores, também conhecidos por Técnica de Estímulo e Resposta.

A dispersão é manifestada na curva do traçador pelo espalhamento da base da curva concentração ao longo do tempo. Esse espalhamento é induzido pelo gradiente de velocidade, uma vez que o perfil de velocidade do fluido é afetado pelo atrito gerando regiões com diferentes velocidades de escoamento; é o efeito combinado da mistura causada pelo perfil de velocidade e pela difusão. O atrito faz com que as partículas sejam transportadas a diferentes velocidades ao longo do perfil. A dispersão faz com que atravessem camadas de diferentes velocidades. Esse efeito combinado é mostrado na FIGURA 5.4.

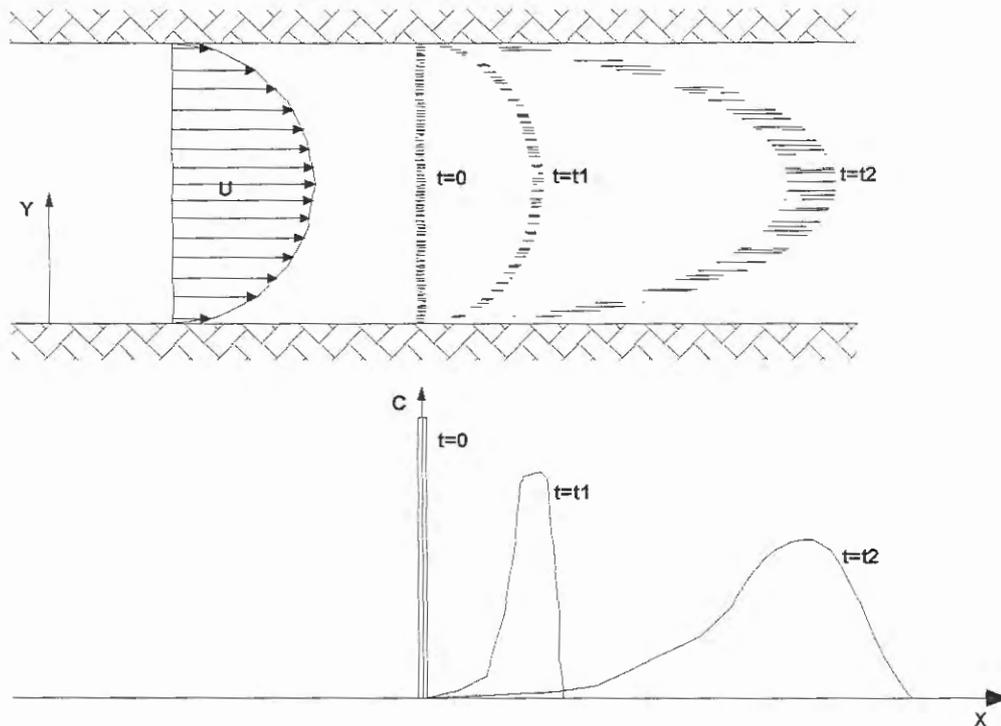


FIGURA 5.4: Dispersão longitudinal

Fonte: FORD & JOHNSON³¹ apud PORTO (1991)

Um método para quantificar a dispersão é o número de dispersão (d), determinado pela equação (5.1):

$$d = \frac{\sigma^2}{\bar{\theta}^2} \quad (5.1)$$

na qual σ^2 é a variância do tempo de residência e, $\bar{\theta}$ é o tempo médio de detenção hidráulico, caracterizado pelo tempo de passagem do centro de massa da curva de concentração do traçador em função do tempo (TEIXEIRA, 1995). Segundo o autor, uma das grandes vantagens de se trabalhar com o coeficiente d decorre do fato deste ser um parâmetro bastante familiar para engenheiros hidráulicos, além de possuir um maior embasamento físico, uma vez que há expressões analíticas que relacionam o número de dispersão (d) e a dispersão longitudinal.

De acordo com TACKSTON et al. (1987) o número de dispersão e o tempo de detenção hidráulico médio são completamente independente entre si. A FIGURA 5.5 mostra quatro curvas com números de dispersão idênticos mas diferentes tempos de detenção

³¹ FORD, D.E.; JOHNSON, L.S. (1986). An assessment of reservoir mixing processes. Technical Report E-86-7. US Army Engineer Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Miss., EUA.

hidráulicos médios, proporcionando então diferentes eficiências hidráulicas³². Por outro lado, a FIGURA 5.6 mostra três curvas com o mesmo tempo de detenção hidráulico médio mas diferentes números de dispersão.

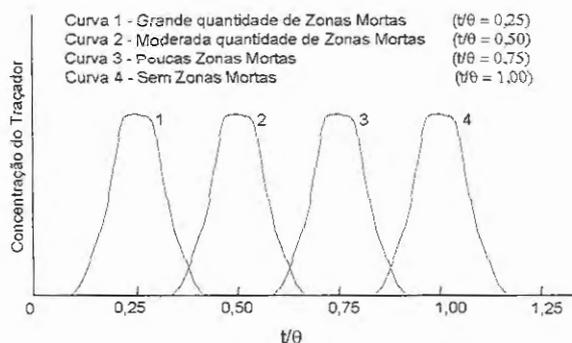


FIGURA 5.5: Curvas com mesmo número de dispersão mas diferentes tempos médios de residência.

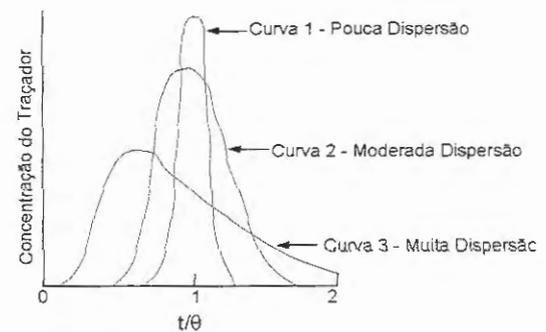


FIGURA 5.6: Curvas com mesmo tempo médio de residência mas diferentes números de dispersão.

Fonte: Adaptado de TACKSTON et al. (1987)

Alguns anos antes, ARCEIVALA (1983) havia observado que em algumas lagoas de estabilização, principalmente aquelas localizadas em locais de clima quente, embora os números de dispersão atingissem valores superiores a 4,0, o meio líquido não estava completamente misturado, estando as lagoas completamente estratificadas termicamente.

TORRES et al. (1997) e TORRES et al. (2000) relataram os experimentos realizados na lagoa facultativa de Espinardo, Campus da Universidade de Murcia (SE da Espanha), utilizando a sulforodamina B como traçador. Ao analisarem as curvas concentração x tempo, os pesquisadores observaram que a curva obtida assemelhava-se muito à curva característica do regime de mistura completa. No entanto, ao compararem o tempo médio de detenção hidráulico com o tempo de detenção hidráulico teórico, TORRES et al. (1997) e TORRES et al. (2000) verificaram que o tempo de detenção hidráulico real era até 5 vezes menor que o tempo de detenção hidráulico teórico. Em ambos os experimentos, os pesquisadores concluíram que a ocorrência da estratificação térmica reduziu o volume ativo em até 1/5 do volume físico total, estando o volume ativo comportando-se hidraulicamente como um reator de mistura completa, corroborando assim as observações feitas por ARCEIVALA (1983).

³² Eficiência hidráulica é a medida do grau de desvio entre as características do escoamento ideal para um dado reator e as características observadas na prática (TEIXEIRA, 1995). Uma das maneiras de avaliar a eficiência hidráulica é observando o número de dispersão d . Para $d = 0$ o escoamento é do tipo tubular (plug-flow), para $d = \infty$ o escoamento é totalmente misturado e, para $0 < d < \infty$ o escoamento é disperso.

5.1 - Técnica de Estímulo e Resposta

O conhecimento da distribuição do tempo de residência (DTR) é utilizado para caracterizar o grau de não idealidade do escoamento.

A DTR é uma função estatística que descreve a probabilidade de uma determinada fração de partículas do fluido permanecer no reator por um determinado tempo. A técnica de estímulo e resposta consiste em verificar a resposta do sistema a um estímulo qualquer, sendo utilizado um traçador para essa finalidade.

A injeção do traçador na entrada da unidade, pode ser instantânea ou contínua, devendo não perturbar (ou perturbar minimamente) o escoamento e permitindo que toda a água que entre na unidade esteja igualmente marcada.

Segundo RIGO & TEIXEIRA (1995) a injeção instantânea do traçador é utilizada quando deseja-se obter a DTR para toda a unidade; já a injeção contínua é utilizada quando deseja-se verificar se o estado permanente foi realmente alcançado.

A curva DTR utilizada para avaliar o grau de desvio da idealidade do escoamento também é conhecida por curva de passagem. A FIGURA 5.7 mostra a representação gráfica de uma curva de DTR com alguns parâmetros utilizados em sua análise.

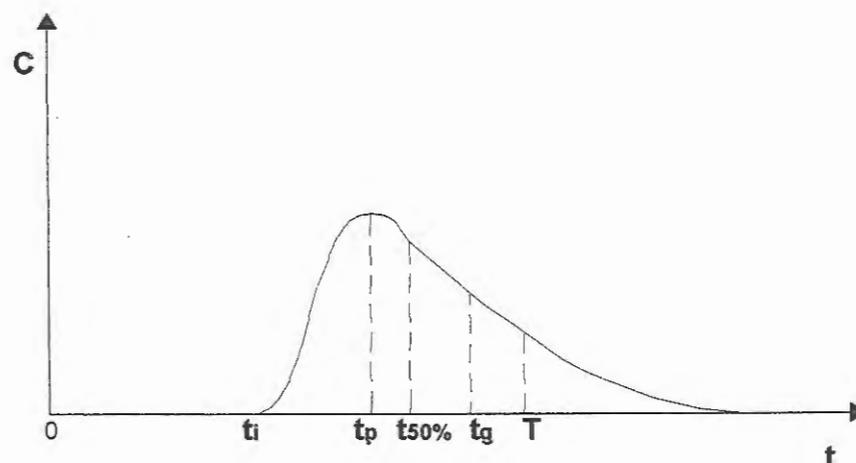


FIGURA 5.7: Representação gráfica de uma curva DTR indicando alguns parâmetros básicos para sua análise

Nota: Adaptado de TEIXEIRA (1995).

t_i é o tempo referente à primeira indicação de traçador na seção de saída do reator;

t_p é o tempo referente à concentração de pico;

$t_{50\%}$ é o tempo para 50% da massa do traçador deixar o reator;

t_g é o tempo referente a passagem do centro de massa;

T é o tempo teórico de residência, resultado da relação entre o volume do reator (V) e a vazão (Q).

O tempo de residência de um elemento do fluido é o tempo transcorrido entre sua entrada e sua saída do reator. Como alguns elementos do fluido percorrem caminhos diferentes a diferentes velocidades, um determinado reator possui diferentes tempos de residência.

Para caracterizar uma DTR possuindo alguns valores numéricos (tempo de coleta e concentração da amostra) é necessário determinar o tempo de detenção hidráulico médio (\bar{t}) e o tempo de detenção hidráulico teórico (T).

O tempo de detenção hidráulico médio, ou tempo médio de residência (\bar{t}), é o tempo de passagem do centróide, ou centro de massa, da curva de distribuição pelo ponto de passagem:

$$\bar{t} = t_g \approx \frac{\sum_{i=1}^N t_i \cdot c_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N c_i \cdot \Delta t_i} \quad (5.2)$$

onde t_i é o tempo transcorrido entre a injeção do traçador e a coleta da amostra i , c_i concentração do traçador presente na amostra i , Δt_i intervalo de tempo entre a coleta de duas amostras consecutivas e N o número total de amostras.

O tempo médio teórico de detenção hidráulico (T), representa a relação entre o volume útil ($V_{\text{útil}}$) do reator e a vazão afluyente (Q), conforme mostrado na eq. (5.3).

$$T = \frac{V}{Q} \quad (5.3)$$

Comumente nos estudos da DTR utiliza-se o tempo de residência médio adimensional (θ) como sendo:

$$\theta = \frac{t_g}{T} \quad (5.4)$$

A forma da curva de passagem fornece importantes informações sobre o comportamento hidrodinâmico dos reatores. Uma dessas informações refere-se aos desvios que podem ocorrer em relação a uma das condições ideais de escoamento.

As FIGURAS 5.8 e 5.9 mostram alguns dos desvios que podem ocorrer em reatores que se aproximam do escoamento tubular e do escoamento em mistura, respectivamente.

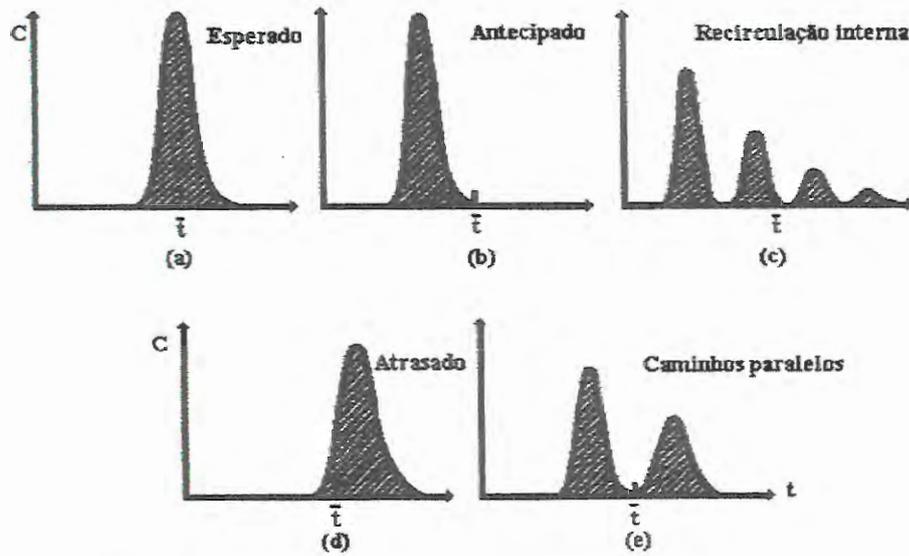


FIGURA 5.8: Tipos de escoamento que podem ocorrer em reatores que se aproximam do escoamento tubular.

Fonte: LEVENSPIEL (1974).

Nota: (a) DTR esperada para escoamento tubular (plug-flow); (b) Aparecimento antecipado do traçador, indicando linhas preferenciais ou zonas mortas; (c) recirculação do líquido no reator; (d) Atraso na resposta indicando erro nas medidas de vazão ou na determinação do volume do reator; (e) Líquido escoando por caminhos diferentes e paralelos.

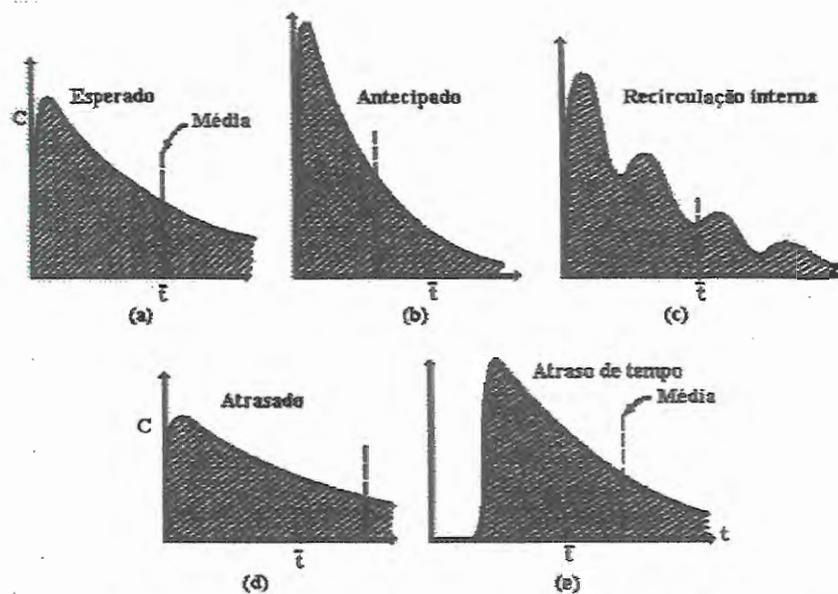


FIGURA 5.9: Tipos de escoamento que podem ocorrer em reatores que se aproximam da mistura completa.

Fonte: LEVENSPIEL (1974).

Nota: (a) DTR esperada para escoamento em mistura; (b) Aparecimento antecipado do traçador, indicando linhas preferenciais ou zonas mortas; (c) recirculação do líquido no reator; (d) Atraso na resposta indicando erro nas medidas de vazão ou na determinação do volume do reator; (e) Zona Morta. As linhas tracejadas indicam o tempo de detenção hidráulico real.

Diferenças entre o tempo de residência médio do traçador e o tempo de detenção hidráulico teórico indicam a existência de correntes preferenciais ou zonas mortas.

5.2 – Estimativa do Tempo de Detenção Hidráulico Médio da Lagoa

O procedimento de cálculo aqui apresentado é continuação do modelo descrito no Capítulo 4.

Conforme mencionado anteriormente, o afluente, ao entrar na lagoa, acomoda-se em uma determinada profundidade, cuja densidade da água da lagoa iguala-se à sua.

Os dispositivos de saída das lagoas estão, geralmente, situados próximos à superfície líquida, retirando da região do epilimnio uma fração do volume da lagoa em um determinado intervalo de tempo. Assim, em um determinado intervalo de tempo (Δt), um volume ($Q \cdot \Delta t$) deixa o elemento de volume i , o qual é substituído por outro volume de igual valor, conforme previsto na equação da continuidade.

Dependendo da localização dos dispositivos de saída e da camada de acomodação do afluente, cria-se uma corrente vertical, originada nesta camada e com destino à camada na qual localiza-se os dispositivos de saída, caracterizando então a “vazão vertical” (Q_z).

A FIGURA 5.10 mostra graficamente a formação de correntes verticais advectivas, complementando a FIGURA 4.2.

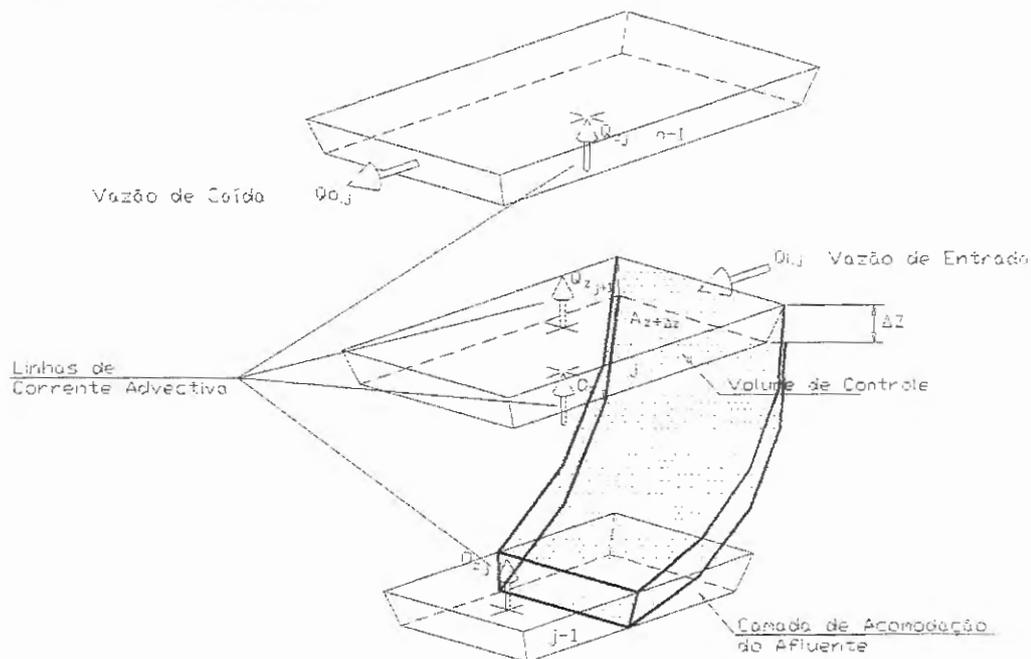


FIGURA 5.10: Formação de correntes verticais advectivas

Dessa maneira, embora o afluente acomode-se em uma camada inferior àquela que contém o dispositivo de saída, cria-se uma corrente vertical advectiva que, com o decorrer do tempo, conduz verticalmente o afluente até a camada superior na qual localiza-se o dispositivo de saída.

Nesse momento vale lembrar que, de acordo com os dados experimentais obtidos por TORRES et al. (1997), TORRES et al. (2000) e as simulações desenvolvidas no Capítulo 4, a profundidade de localização do dispositivo de saída da lagoa determina o limite inferior do epilânio, contido portanto no volume útil da lagoa.

Admitindo-se então que o afluente chegue a região do volume útil, devido a sua homogeneidade, o afluente espalha-se por toda a área transversal do volume útil, gerando um fluxo horizontal, direcionado da entrada para a saída da lagoa, conforme mostrado na FIGURA 5.11.

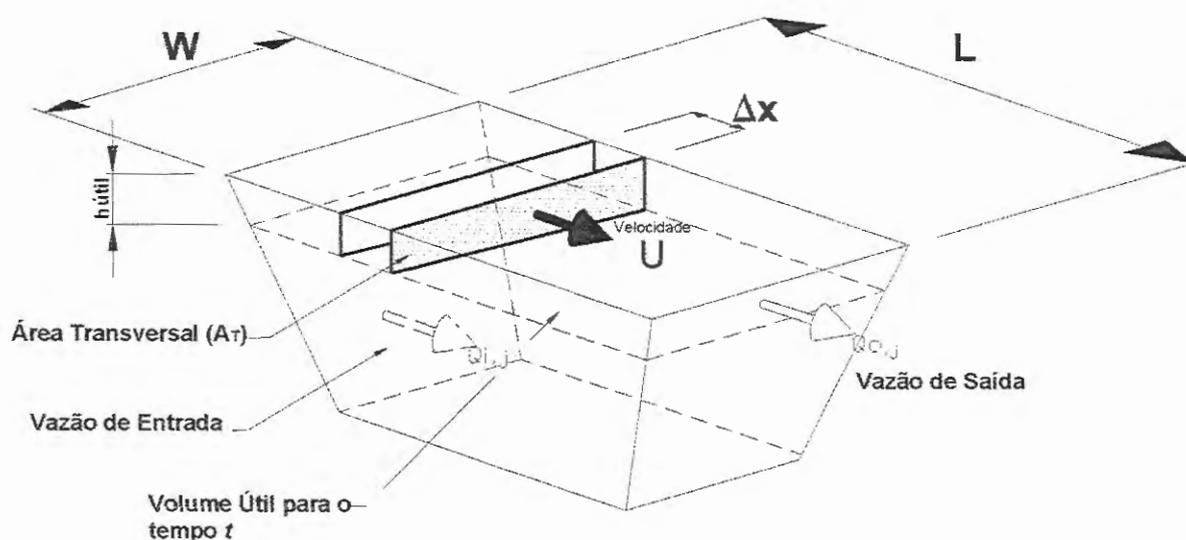


FIGURA 5.11: Desenho esquemático do fluxo advectivo.

Dessa maneira, a velocidade média linear pode ser expressa pela equação:

$$U = \frac{Q}{A_T} \quad (5.5)$$

onde U é a velocidade média linear ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); Q é a vazão ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) e A_T é a seção transversal do volume útil (m^2).

Assim, para um determinado intervalo de tempo Δt , o espaço percorrido pelo fluxo é calculado pela equação:

$$\Delta x = U \cdot \Delta t \quad (5.6)$$

sendo Δx o espaço percorrido pelo fluxo com velocidade U , em um determinado intervalo de tempo Δt especificado para toda a simulação.

Sendo L o comprimento da lagoa, Δx_i o espaço percorrido pelo fluxo no tempo i , o tempo de passagem do centro de massa do fluxo (t_g) pode ser determinado pela equação:

$$t_g \approx (n \cdot \Delta t) \quad \text{quando} \quad \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{L} = 1 \quad (5.7)$$

sendo n o número de passos executados até que $\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{L} = 1$

5.3 – Avaliação dos Resultados Obtidos na Simulação Numérica

O cálculo do tempo de detenção hidráulico médio, corrigido para a situação de estratificação térmica é função da vazão afluente, do comprimento, do volume útil da lagoa e, conseqüentemente, do critério para verificação da ocorrência da estratificação térmica.

A fim de avaliar os critérios utilizados para a determinação do volume útil da lagoa (gradiente de densidade automático, diferença de temperatura e gradiente de temperatura) compararam-se os tempos de detenção hidráulico adimensionais obtidos pelo modelo matemático com o tempo de residência médio adimensional (θ) obtido experimentalmente por SILVA (1982) para a região de Campina Grande (PB). Não foi possível realizar a mesma análise para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP), pois os ensaios com traçadores não foram apresentados por VIDAL (1983).

5.3.1 – Avaliação dos Resultados para Região de Campina Grande (PB)

No Capítulo 4 foram apresentados resultados de simulações considerando três métodos para determinação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB): gradiente de densidade automático, gradiente de temperatura (0,6°C/m) e diferença de temperatura (1,25°C).

O volume útil da lagoa de Campina Grande (PB) foi calculado para cada hora do dia, num período de 365 dias.

SILVA (1982) realizou ensaio com traçador para determinar o tempo de detenção hidráulico da lagoa facultativa. O autor comparou esse valor com o tempo de detenção hidráulico teórico, obtendo a relação de 0,70.

Embora SILVA (1982) não tenha feito referência ao dia da realização do ensaio com traçador, admitiu-se que o mesmo tenha sido iniciado juntamente com as medidas da temperatura ao longo da vertical, 06/07/1977.

Dessa maneira, calculou-se o tempo médio de permanência do líquido na lagoa (t_e) considerando o efeito da estratificação térmica no meio líquido, e relacionou-o com o tempo de detenção hidráulico teórico, obtendo-se os resultados apresentados na FIGURA 5.12.

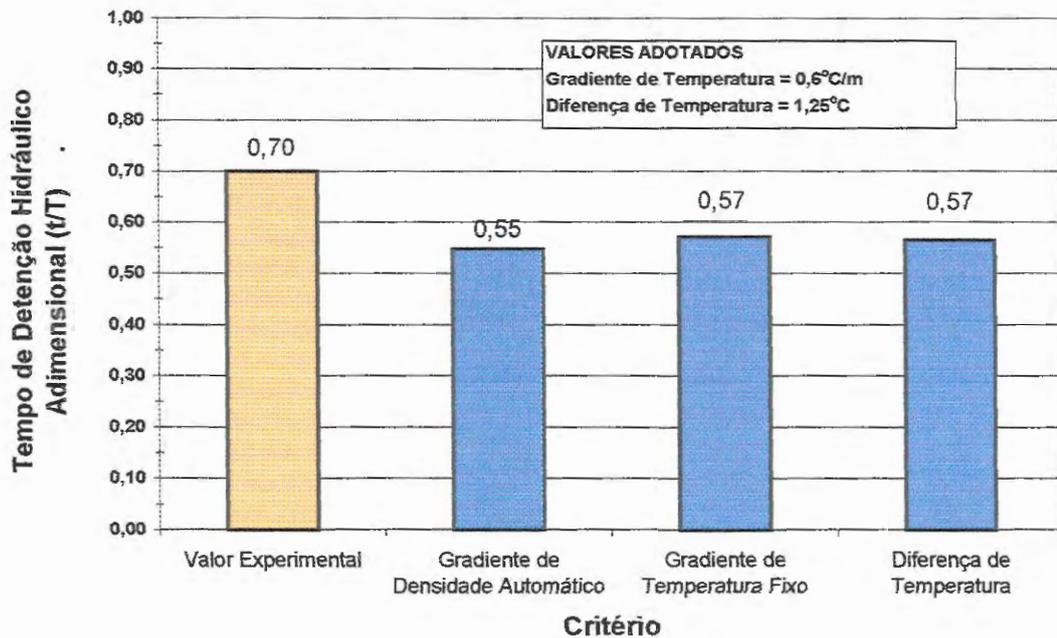


FIGURA 5.12: Comparação entre os tempos de residência adimensionais obtido experimentalmente e pelos critérios para determinação do volume útil para a lagoa de Campina Grande (PB)

A fim de avaliar o erro percentual entre os tempos de detenção hidráulicos adimensionais, calculou-se a diferença relativa entre o valor apresentado por SILVA (1982) e aqueles obtidos pela simulação numérica, estando os resultados apresentados graficamente na FIGURA 5.13.

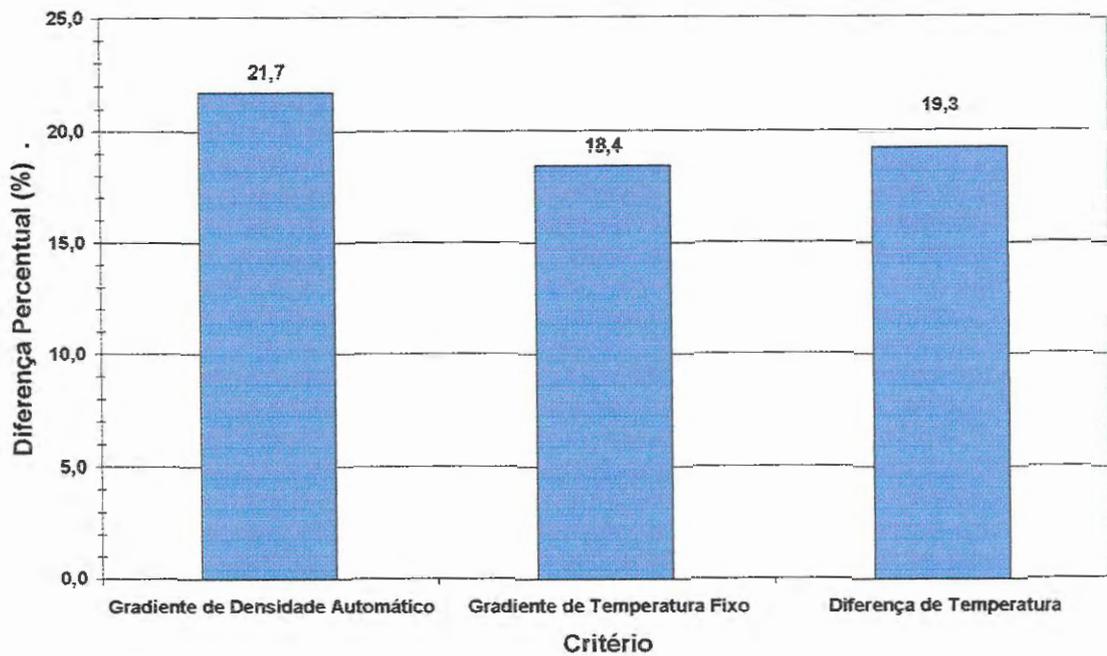


FIGURA 5.13: Erro relativo entre o valor dos tempos de detenção hidráulico adimensionais obtido por SILVA (1982) e aqueles obtidos pela simulação numérica, em função do critério utilizado para determinação do volume útil.

Analisando a FIGURA 5.13 é possível observar que o maior erro relativo ocorreu quando aplicou-se o critério do gradiente automático de densidade, com 21,7%, seguido pelo critério da diferença de temperatura, com 19,3% e, em seguida pelo critério do gradiente fixo de temperatura, com 18,4%. No entanto, a diferença é pequena e pode não ser significativa.

O critério baseado no Gradiente de Densidade forneceu volumes úteis menores que os demais critérios, resultando em um menor tempo de detenção hidráulico teórico quando comparado com os demais critérios estabelecidos para determinação do volume útil da lagoa.

Em função da possibilidade de se alterar os valores fixados para simular o volume útil da lagoa segundo os critérios do Gradiente de Temperatura Fixo e da Diferença de Temperatura, fez-se novas simulações para determinação do variação do volume útil ao longo do ano, a fim de identificar o valor que melhor se adequa aos cálculos e verificar a viabilidade física de sua ocorrência.

Empregando-se o critério do Gradiente de Temperatura Fixo, fez-se novas simulações para determinação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB) considerando-se os valores de $0,60^{\circ}\text{C}/\text{m}$, $0,70^{\circ}\text{C}/\text{m}$, $0,75^{\circ}\text{C}/\text{m}$ e $0,80^{\circ}\text{C}/\text{m}$ para a ocorrência da estratificação térmica. Os resultados dos tempos de detenção hidráulicos adimensionais foram comparados com aquele obtido por SILVA (1982), calculando-se então os erros relativos absolutos, os quais estão apresentados na FIGURA 5.14.

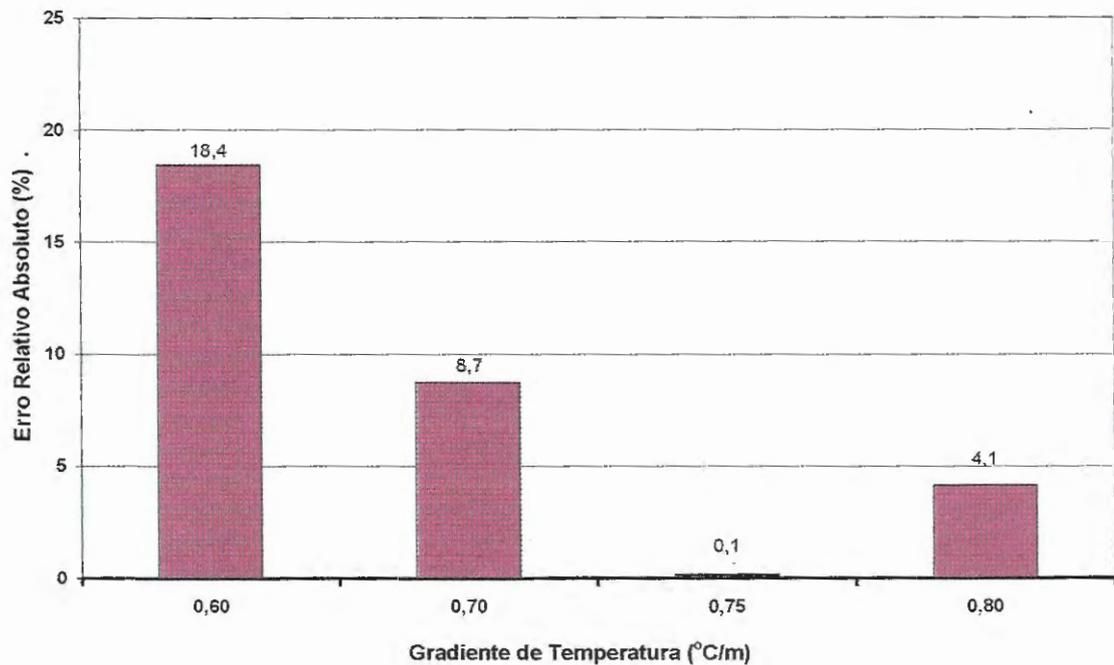


FIGURA 5.14: Erro Relativo Absoluto entre os tempos de detenção hidráulico adimensionais obtidos por SILVA (1982) e por simulações numéricas aplicando o critério do Gradiente de Temperatura.

Analisando o gráfico apresentado na FIGURA 5.14, observou-se que ao aplicar o critério do Gradiente de Temperatura fixado em $0,75^{\circ}\text{C}/\text{m}$, o erro relativo absoluto entre o tempo de detenção hidráulico adimensional encontrado por SILVA (1982) e pela simulação foi de 0,1%.

Empregando-se o critério da Diferença de Temperatura, fez-se novas simulações para determinação do volume útil da lagoa de Campina Grande (PB), nas quais foram consideradas os valores de $1,25^{\circ}\text{C}$, $1,50^{\circ}\text{C}$, $1,75^{\circ}\text{C}$, $2,00^{\circ}\text{C}$ e $2,50^{\circ}\text{C}$ para a ocorrência da estratificação térmica. Os resultados dos tempos de detenção hidráulicos adimensionais foram comparados com aquele obtido por SILVA (1982), calculando-se então os erros relativos absolutos, os quais estão apresentados na FIGURA 5.15.

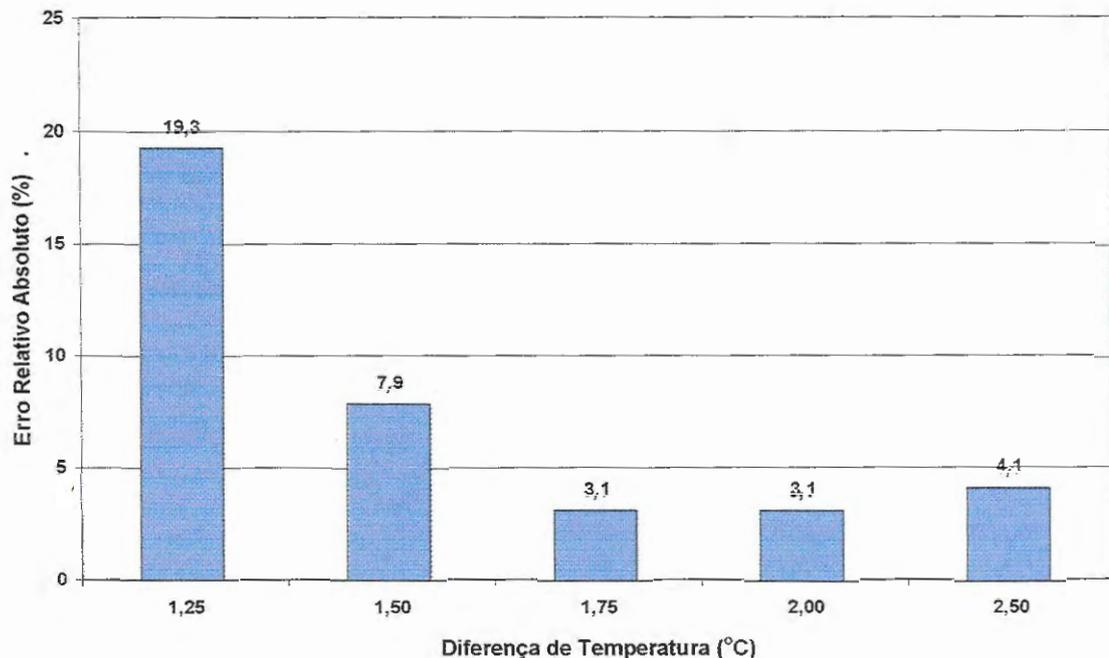


FIGURA 5.15: Erro Relativo Absoluto entre os tempos de detenção hidráulico adimensionais obtidos por SILVA (1982) e por simulações numéricas aplicando o critério da Diferença de Temperatura.

Analisando o gráfico apresentado na FIGURA 5.15, observou-se que ao aplicar o critério da Diferença de Temperatura para valores entre 1,75 e 2,00°C, o erro relativo absoluto entre o tempo de detenção hidráulico adimensional encontrado por SILVA (1982) e pela simulação foi de 3,1%.

Os gráficos apresentados nas FIGURAS 5.14 e 5.15 permitem verificar a grande sensibilidade existente entre o critério adotado para verificação da estratificação térmica e estimação do volume útil. Observou-se também que o emprego do critério do gradiente de temperatura permitiu um melhor ajuste para determinação do volume útil da lagoa de estabilização, se comparado com os demais critérios apresentados.

5.3.2 – Avaliação dos Resultados para Região de Santa Fé do Sul (SP)

No Capítulo 4 foram apresentados resultados de simulações considerando três métodos para determinação do volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP): gradiente de densidade automático, gradiente de temperatura (0,6°C/m) e diferença de temperatura (1,50°C).

O volume útil da lagoa de Santa Fé do Sul (SP) foi calculado para cada hora do dia, num período de 365 dias.

Conforme mencionado no início desta seção, VIDAL (1983) não realizou ensaio com traçadores para verificação do tempo de detenção hidráulico real da lagoa de Santa Fé do Sul (SP), fato este que impossibilitou a verificação da acuracidade e precisão das simulações.

Dessa maneira, simulou-se o tempo de detenção hidráulico adimensional (t_d) da lagoa de Santa Fé do Sul, considerando o efeito da estratificação térmica no meio líquido, empregando os critérios do Gradiente Automático de Densidade, Gradiente Fixo de Temperatura e Diferença de Temperatura. Para efeito de cálculo do tempo de detenção hidráulico, considerou-se como data inicial o dia das realizações das medidas de temperatura do perfil vertical: 05/03/80.

A FIGURA 5.16 mostra graficamente os resultados obtidos a partir da simulação numérica.

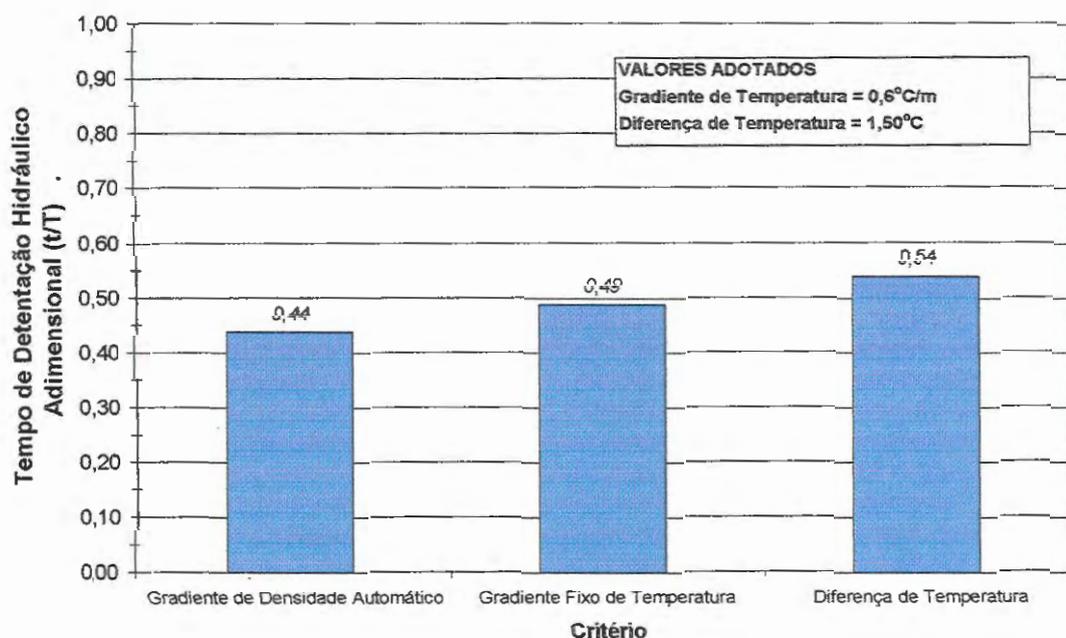


FIGURA 5.16: Tempos de residência adimensionais obtidos a partir da simulação numérica feita para a lagoa de Santa Fé do Sul (SP), em função dos critérios para determinação do volume útil

Analisando o gráfico de barras mostrado na FIGURA 5.16, observou-se que o critério do Gradiente de Densidade Automático resultou em um menor tempo de detenção hidráulico adimensional. A aplicação do critério da Diferença de Temperatura resultou o maior aproveitamento da lagoa, com tempo de detenção hidráulico adimensional de 0,54. Os

resultados obtidos da simulação numérica, a partir do emprego do critério do Gradiente Fixo de Temperatura resultaram em um tempo de detenção hidráulico adimensional de 0,49. Essa constatação indica, mais uma vez, a importância que pode ter a estratificação térmica. Observe-se que fica previsto um tempo de detenção que é praticamente metade do tempo teórico que é utilizado no projeto e avaliação da eficiência do tratamento.

6

DISCUSSÃO

Nos capítulos anteriores foram apresentados e discutidos a influência da estratificação térmica nas lagoas de estabilização, tanto do ponto de vista da qualidade do efluente quanto do comportamento hidrodinâmico dessas unidades de tratamento.

O desenvolvimento de um modelo matemático para cálculo do perfil vertical de temperatura, permitiu que fossem realizadas simulações numéricas e comparadas com medidas reais obtidas por SILVA (1982) e VIDAL (1983). Essas simulações auxiliaram a visualização de algumas informações referentes à estratificação térmica em lagoas de estabilização, assim como permitiram acompanhar a variação do perfil vertical de temperatura ao longo do ano e, com isso, avaliar a influência da estratificação térmica no tempo de detenção hidráulico da lagoa durante o período considerado.

A utilização do modelo matemático também permitiu avaliar o cálculo estimativo das radiações atmosféricas comparando-se os resultados simulados com aqueles medidos em campo.

Neste capítulo faz-se um apanhado geral sobre cada um dos temas apresentados, discutindo os pontos mais importantes.

6.1 – Radiação Térmica

O modelo matemático utilizado para estimação da energia térmica disponível no local de implantação da lagoa, apresentado no Capítulo 3, considerou 7 tipos de radiações incidentes: radiação térmica perdida por evaporação (H_e), radiação térmica atmosférica incidente de ondas longas (H_a), radiação térmica atmosférica refletida de ondas longas (H_{ar}), radiação térmica incidente de ondas curtas (I_s), radiação térmica refletida de ondas curtas

(I_{sr}), radiação térmica de ondas longas emitidas pela água (H_w) e radiação térmica ganha ou perdida por condução para o ambiente (H_c).

A diferença entre H_a e H_{ar} resulta na equação que descreve a radiação térmica atmosférica líquida de ondas longas que penetra no volume líquido (H_{a_n}) – ver eq. (3.15) – escrita em função da temperatura do ar (T_a) e da fração de cobertura do céu por nuvens (C).

Assim como todo corpo aquecido, a água da lagoa também emite radiação térmica de ondas longas (H_w) – ver eq. (3.16) – escrita em função da temperatura da superfície da água (T_s).

O balanço global de energia entre H_{a_n} e H_w fica em função, basicamente, das temperaturas do ar e da superfície da lagoa. Como T_a e T_s são da mesma ordem de grandeza, é de se esperar que o residual da troca de energia térmica entre a atmosfera e o corpo líquido seja pequeno, não influenciando significativamente na quantidade de energia térmica líquida (H_{net}). Nesse caso, a correlação entre H_{net} e ($H_{a_n} - H_w$) deve ser pequena – ver FIGURA 6.1.

Quando há uma diferença de temperatura entre a superfície líquida da lagoa e a temperatura do ar, existe um gradiente de temperatura, fazendo com que ocorra uma transferência de energia da região de alta temperatura para a região da baixa temperatura. A equação que descreve a transferência de energia térmica por condução (H_c) – ver eq. (3.20) – é função da velocidade do vento (V_v) e da diferença de temperatura entre a superfície líquida da lagoa (T_s) e do ar (T_a).

Como a temperatura do ar é da mesma ordem de grandeza da temperatura da superfície líquida é de se esperar que a diferença entre T_a e T_s seja pequena, resultando valores desprezíveis para a troca de energia térmica por condução (H_c). Assim, a correlação entre H_{net} e H_c deve ser pequena – ver FIGURA 6.1.

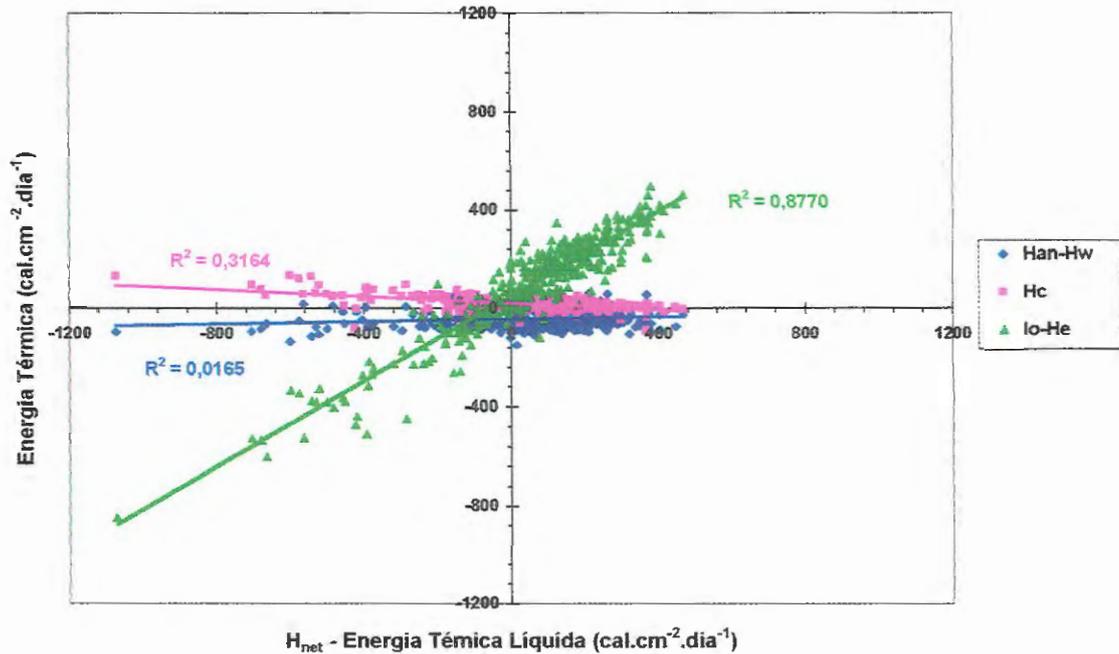


FIGURA 6.1 – Correlações entre H_{net} e $(H_{a_n} - H_w)$, H_c e $(I_o - H_e)$ para a represa do Broa - 1995

Uma vez que o balanço térmico de ondas longas e a energia térmica trocada por condução não influem significativamente sobre a energia térmica líquida disponível, conclui-se que esta última é função da energia térmica de ondas curtas que passa pela superfície líquida (I_o) – fonte de energia - e pela energia térmica perdida pela evaporação da água (H_e) – consumidor de energia.

Em geral, quando a perda de energia térmica decorrente da evaporação (H_e) supera a energia térmica proveniente da radiação de ondas curtas que penetra a superfície do corpo d'água (I_o), o corpo líquido perde calor e H_{net} passa a ter valor negativo (KELLNER & PIRES, 1999).

Para determinar o grau de dependência entre a energia térmica líquida (H_{net}) e $(H_{a_n} - H_w)$, H_c e $(I_o - H_e)$, calculou-se o coeficiente de correlação linear (R^2) sendo obtido os valores de 0,0165; 0,3164 e 0,8770, respectivamente, conforme mostrado no gráfico apresentado na FIGURA 6.1.

A energia térmica perdida pela evaporação (H_e) é determinada em função da temperatura do ar (T_a), da temperatura da superfície líquida (T_s), da umidade relativa do ar (R_h) e da velocidade do vento (V_w) evidenciando a importância deste no processo de desestratificação térmica da lagoa, provocada, sobretudo, pelo resfriamento das camadas superficiais ocasionando a inversão térmica, corroborando a informação de JIRKA et al. (1980).

6.2 – Cálculo do Perfil de Temperatura

A aplicação do modelo matemático apresentado, permite o cálculo do perfil de temperatura de uma lagoa de estabilização para qualquer dia e hora do ano.

O cálculo do perfil térmico da lagoa resume-se, basicamente, na resolução do balanço térmico o qual compreende: a energia térmica introduzida pelo afluente, a energia térmica retirada pelo efluente e a energia térmica disponibilizada pelo ambiente. Dessa maneira, o cálculo do perfil de temperatura recai na resolução de um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

O modelo matemático considerou o volume líquido da lagoa dividido em n partes, todas paralelas à superfície. Em cada uma dessas partes foi aplicado o balanço térmico associado ao balanço de massa. Dessa maneira a determinação do perfil de temperatura da lagoa resume-se no cálculo de um conjunto de equações do tipo $T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + h \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$, onde h representa o passo temporal empregado na simulação e $\frac{\partial T}{\partial t}$ a equação diferencial, obtida do balanço térmico, que descreve a variação da temperatura em relação ao tempo para uma determinada camada.

Conforme mencionado no Capítulo 4, a discretização das equações diferenciais foi feita avançada no tempo, já que se conhecia o perfil de temperatura no tempo t .

Embora a discretização centrada resulte erros menores que aqueles gerados pela discretização avançada, optou-se por “sacrificar” um pouco a precisão numérica já que a diferença centrada conduzia a um valor restritivo de h .

Assim, para o cálculo de $\frac{\partial T}{\partial t}$ o modelo matemático unidimensional de múltiplas camadas calcula a temperatura de cada camada da lagoa utilizando-se de um dos métodos numéricos considerados: Runge-Kutta de 4ª ordem ou Heun (também conhecido por Euler ou Runge-Kutta de 2ª ordem).

O erro de discretização associado ao método de Runge-Kutta de 4ª ordem é da ordem de h^4 , enquanto o erro associado ao método de Heun é da ordem de h^2 , interferindo diretamente na precisão dos resultados. As FIGURAS 6.2 e 6.3 mostram a variação dos perfis de temperatura em função do passo utilizado para o cálculo, empregando-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem e o método de Heun, respectivamente.

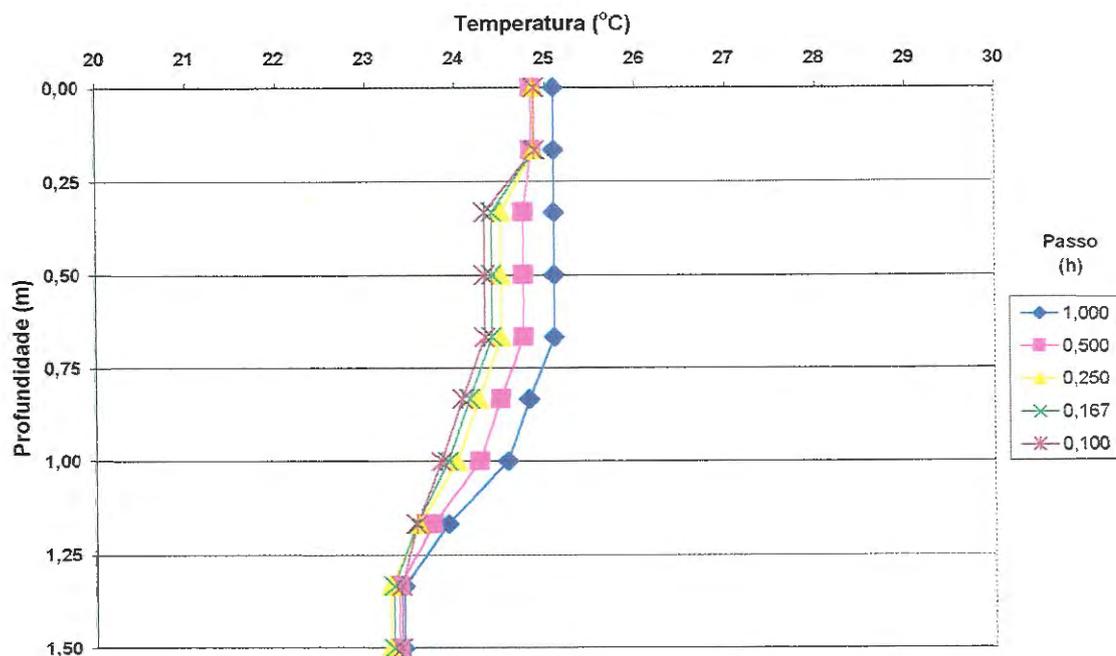


FIGURA 6.2: Variação dos perfis de temperatura em função do passo adotado, empregando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem

Nota: Simulações referentes ao dia 20/Agosto à 1:00h para a lagoa de Santa Fé do Sul

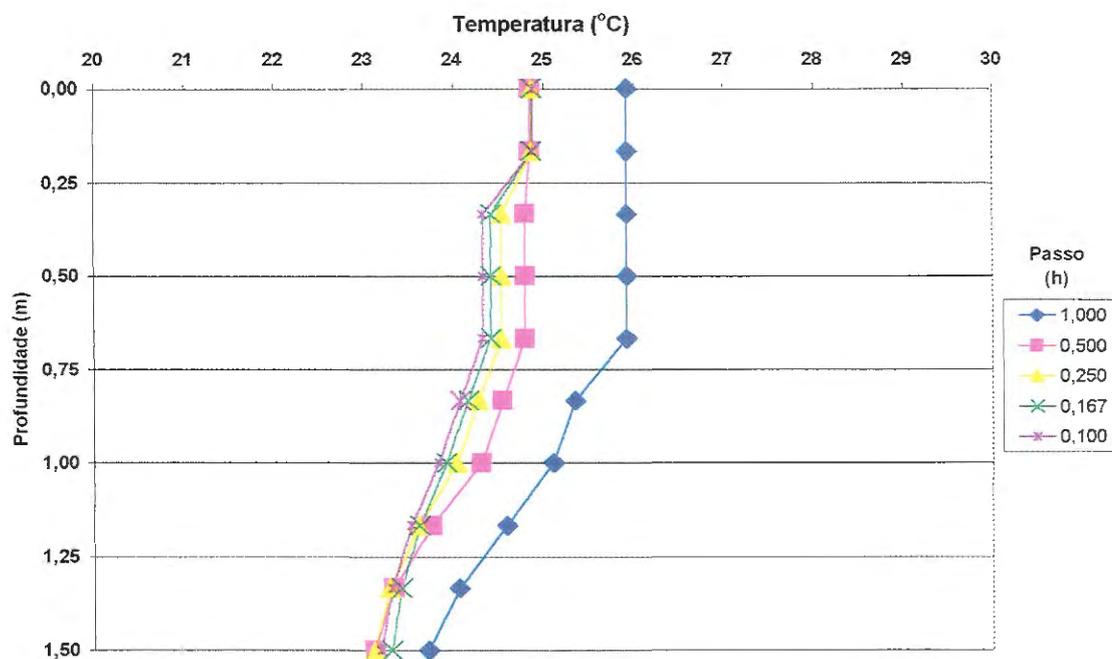


FIGURA 6.3: Variação dos perfis de temperatura em função do passo adotado, empregando o método de Heun

Nota: Simulações referentes ao dia 20/Agosto à 1:00h para a lagoa de Santa Fé do Sul

Comparando os resultados dos perfis de temperatura apresentados nas FIGURAS 6.2 e 6.3 é possível observar que o perfil simulado empregando-se o método de Runge-Kutta de 4ª ordem converge mais rapidamente para uma determinada situação, independente do valor do passo utilizado, se comparado ao resultado obtido da aplicação do método de Heun. Para intervalos de tempo menores ou iguais a 0,5 hora, os resultados das simulações empregando-se os métodos de Heun ou Runge-Kutta de 4ª ordem são praticamente os mesmos.

A desvantagem da utilização do método de Runge-Kutta de 4ª ordem, neste caso, é o tempo de processamento, já que para a simulação de um perfil de temperatura para um determinado horário é necessário a resolução de 4 sistemas matriciais para cálculo das equações diferenciais, enquanto que para resolução pelo método de Heun, basta o cálculo de 2 sistemas matriciais para determinação das equações diferenciais. Assim, o emprego do método de Runge-Kutta de 4ª ordem pode aumentar o tempo de processamento, estimado pela eq. (4.28) em até 4 vezes.

6.3 – Indicadores de Estratificação Térmica

Com base nos resultados obtidos a partir da simulação dos perfis térmicos, verificou-se o comportamento de três indicadores de estratificação térmica: Número Pond, Número MIX e Número de Froude.

A análise feita para esses três indicadores mostrou que a determinação do número de Froude conduz a resultados matematicamente simples e bastante satisfatório (ver Seção 4.3.4).

Os valores limites do número de Froude, característicos para verificação do nível de estratificação térmica em lagos sugerida por ORLOB (1983) não foram possíveis de se confirmar, embora tenha-se verificado que para $F_D \gg 1,0$ tenha ocorrido a mistura completa ao longo da profundidade das lagoas de Campina Grande (PB) e Santa Fé do Sul (SP).

Além dos indicadores de estratificação, observou-se que a relação entre a potência térmica fornecida pelo ambiente ($W_{AMBIENTE}$) – ver eq. (4.26) - e a potência térmica contida no afluente ($W_{AFLUENTE}$) – ver eq. (4.27) - parece indicar um melhor aproveitamento do volume físico da lagoa de estabilização quando tal relação resulta menor que 1,0.

Como a relação $\left(\frac{W_{\text{AMBIENTE}}}{W_{\text{AFLUENTE}}}\right)$ é diretamente proporcional à área superficial da lagoa (A) e a energia térmica líquida (H_{net}) e inversamente proporcional à vazão (Q) e à temperatura afluenta (T_{in}) conclui-se que, em duas lagoas idênticas, cada uma locada em uma determinada região do país, podem resultar diferentes aproveitamentos de seus volumes físicos.

6.4 – Determinação do Volume Útil

O volume útil da lagoa representa o volume líquido situado acima da termoclina, a qual é determinada a partir de um gradiente térmico. Como não há um valor bem definido para o gradiente térmico, a fim de verificar a ocorrência da estratificação, faz-se necessário utilizar algum critério para fixá-lo.

Nas simulações realizadas foram considerados três critérios para determinação da termoclina: Gradiente de Densidade, Gradiente de Temperatura e Diferença de Temperatura.

Em função de cada um desses critérios, calculou-se o volume útil da lagoa de Campina Grande (PB) assim como o tempo de residência médio adimensional (θ) e comparado com o valor obtido experimental por SILVA (1983).

De acordo com as simulações numéricas, os melhores resultados foram conseguidos com o critério do Gradiente de Temperatura, com valores ótimos compreendidos entre 0,70 e 0,80°C/m. Considerando 0,75°C/m como gradiente térmico para ocorrência da estratificação térmica na lagoa de Campina Grande (PB) obteve-se uma diferença de 0,1% no tempo médio de residência adimensional se comparado com o valor obtido experimentalmente (0,70).

O critério do Gradiente de Densidade mostrou-se bastante rigoroso quanto a determinação da ocorrência da estratificação térmica, resultando diferenças percentuais da ordem de 20% se comparados os volumes úteis simulado e obtido experimentalmente (ver FIGURA 5.13).

O critério da Diferença de Temperatura mostrou resultados tão bons quanto aqueles obtidos pelo critério do Gradiente de Temperatura, o que era esperado, já que um está diretamente relacionado com o outro. Verificou-se que os valores da diferença de temperatura compreendidos entre 1,75°C e 2,00°C entre o epilímnio e o hipolímnio resultaram nas menores diferenças percentuais entre os tempos de residência médios adimensionais calculado e obtido experimentalmente.

6.5 – Programa Computacional

Desenvolveu-se um programa computacional escrito na linguagem *VisualBASIC* (versão 5.0) contendo modelos matemáticos capazes de simular o balanço de energia térmica, calcular o perfil vertical de temperatura e estimar o volume efetivamente percorrido pelo afluente em uma lagoa de estabilização e, estimar o tempo de detenção hidráulico da lagoa, conforme apresentado nos capítulos 3, 4 e 5, respectivamente.

O módulo para cálculo do balanço de energia térmica está baseado no trabalho de FRITZ (1980); já o modelo para cálculo do perfil vertical de temperatura baseou-se nos trabalhos de NORTON & KING (1974) e ORLOB (1983).

No desenvolvimento do programa computacional, em especial com relação aos dados de entrada, considerou-se a dificuldade na obtenção dos mesmos, principalmente aqueles referentes às características climáticas. Esses dados nem sempre estão disponíveis e muitas vezes são inexistentes. Esse fato faz com que sejam considerados valores médios mensais para parâmetros cuja alteração real é horária. Um exemplo são os valores das temperaturas médias mensais do ar. A temperatura do ar pode variar bruscamente ao longo do dia, no entanto, são raras as vezes que essa informação está disponível.

Características climáticas como o percentual de cobertura do céu por nuvens e velocidades dos ventos também não são, normalmente, facilmente obtidos.

Assim, essas limitações existentes tanto para a obtenção quanto para a disponibilização dos dados de entrada nortearam o desenvolvimento do programa computacional. Apesar disso, mesmo admitindo-se mensalmente constantes alguns parâmetros que apresentam variações horárias significativas, os resultados obtidos nas simulações numéricas para o cálculo do perfil vertical de temperatura, empregando o programa computacional desenvolvido, diferenciaram de $\pm 10\%$ quando comparados com os dados medidos na lagoa de Campina Grande (PB) por SILVA (1982), e de $\pm 15\%$ quando comparados com os dados medidos na lagoa de Santa Fé do Sul (SP) por VIDAL (1983) – ver FIGURAS 4.13 e 4.18, respectivamente. Para simulações como aqui apresentada essas diferenças são consideradas pequenas.

O programa computacional está dividido, basicamente, em seis módulos compreendendo: Informações geográficas do local de implantação, informações sobre as características climáticas do local de implantação, características quantitativas do afluente, características físicas da lagoa, propriedades da simulação e realização dos cálculos.

O módulo *Informações Geográficas do Local de Implantação*, mostrado na FIGURA 6.4, permite que sejam fornecidas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e a

altitude do local de implantação da lagoa, possibilitando a visualização aproximada da localização no mapa.

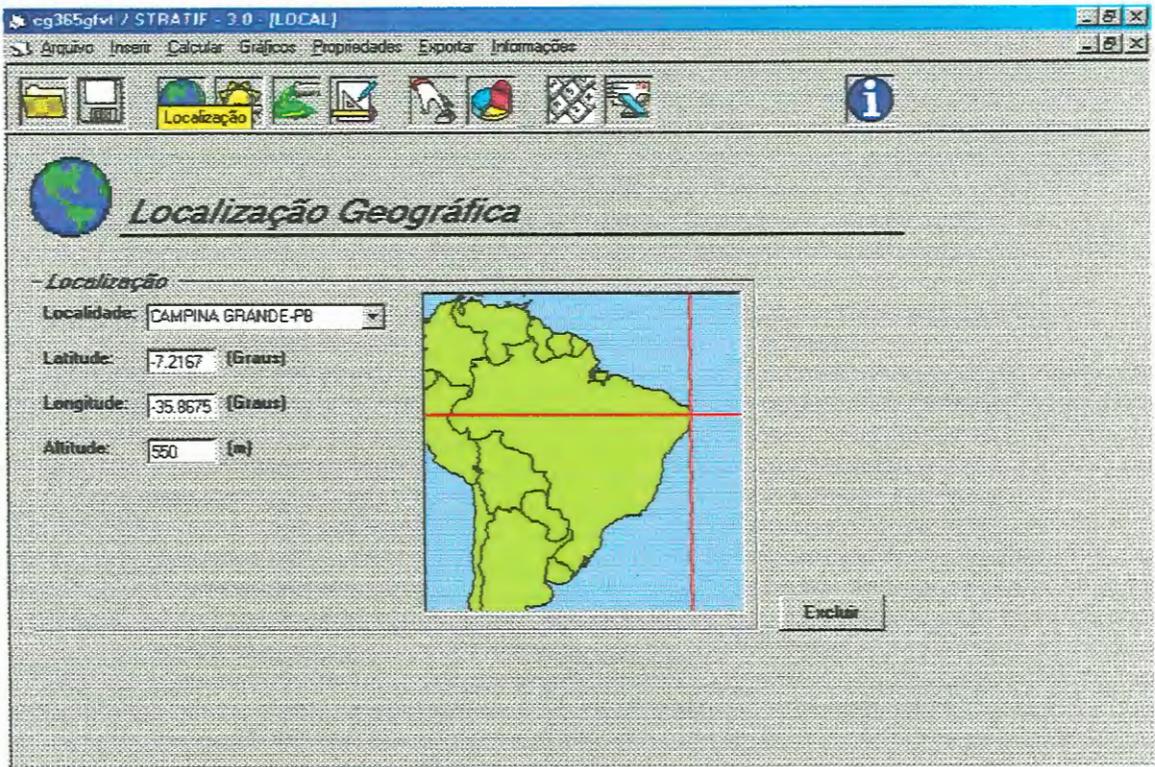


FIGURA 6.4: Tela para entrada das coordenadas geográficas e da altitude do local de implantação da lagoa de estabilização

Variações da ordem de $\pm 21'$ ($\pm 0,35^\circ$) para os valores da longitude e latitude mostraram-se sensíveis no cálculo do perfil vertical de temperatura da lagoa.

A altitude do local de implantação não influenciou significativamente nos resultados obtidos pela simulação, mostrando ser o modelo pouco mais sensível a esta variável. Deve-se, no entanto, lembrar que a medida que aumenta-se a altitude do local de implantação, o oxigênio presente na atmosfera torna-se mais rarefeito, o que influencia tanto na taxa de transferência ar-água como na concentração de saturação do oxigênio na água.

A FIGURA 6.5 mostra o módulo referente aos Dados Climáticos do local de implantação, permitindo que sejam fornecidas as médias mensais referentes à evaporação, precipitação, fração do céu coberto por nuvens, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar. Esse módulo é de extrema importância para a estimativa das energias térmicas presentes no balanço de energia: radiação solar líquida de ondas curtas (I_o), radiação atmosférica líquida de ondas longas (H_{an}), radiação de ondas longas emitida pela água (H_w),

energia térmica perdida pela evaporação (H_e) e energia térmica perdida por condução e convecção (H_c).

FIGURA 6.5: Tela para entrada dos Dados Climáticos

O módulo Características Quantitativas do Afluente mostrado na FIGURA 6.6, permite que seja definida a forma de variação temporal do afluente, tanto para a temperatura quanto para a vazão.

FIGURA 6.6: Tela para entrada dos dados referentes às características quantitativas do afluente.

A FIGURA 6.7 mostra a tela padrão para que sejam fornecidas as dimensões básicas da lagoa de estabilização: comprimento, largura, profundidade, profundidade da tubulação afluente, profundidade da tubulação efluente e relação h:v do talude interno.

The screenshot shows the 'DIMENSÕES' (Dimensions) window of the STRATIF 3.0 software. The window title is 'STRATIF - 3.0 - [DIMENSÕES]'. The menu bar includes 'Arquivo', 'Inserir', 'Calcular', 'Gráficos', 'Propriedades', 'Exportar', and 'Informações'. The toolbar contains various icons, including a ruler and a pencil. The main area is titled 'Dimensões da Lagoa' and contains the following input fields:

L - Comprimento (m):	<input type="text" value="0.00"/>	Área Superficial (m²):	<input type="text" value="0.00"/>
W - Largura (m):	<input type="text" value="0.00"/>	Área a 1/2 profundidade (m²):	<input type="text" value="0.00"/>
H - Profundidade Útil (m):	<input type="text" value="0.00"/>	Área do fundo (m²):	<input type="text" value="0.00"/>
Za - Profundidade da tubulação afluente (m):	<input type="text" value="0.00"/>	Volume da lagoa (m³):	<input type="text" value="0.00"/>
Ze - Profundidade da tubulação efluente (m):	<input type="text" value="0.00"/>	Relação L/W:	<input type="text" value="1 : 1"/>
Declividade interna do talude (h/v):	<input type="text" value="1 : 1"/>		

FIGURA 6.7: Tela para entrada das dimensões da lagoa

The screenshot shows the 'PROPRIEDADES' (Properties) window of the STRATIF 3.0 software. The window title is 'STRATIF - 3.0 - [PROPRIEDADES]'. The menu bar includes 'Arquivo', 'Inserir', 'Calcular', 'Gráficos', 'Propriedades', 'Exportar', and 'Informações'. The toolbar contains various icons, including a ruler and a pencil. The main area is titled 'Propriedades' and contains the following input fields and options:

Es - Coeficiente de Difusão Vertical (m²/s):	<input type="text" value="1E-12"/>	Localização de Entrada Tipo de clima: Inserir Propriedades ou Carregar dados locais: <input checked="" type="radio"/> Campina Grande (BRASIL) <input type="radio"/> Aman (JORDÂNIA) <input type="radio"/> Lima (PERU) <input type="radio"/> Usário (T=A=B=C) <input type="radio"/> Nenhum
D _{sl} - Profundidade do Disco de Sacchi (m):	<input type="text" value="0.30"/>	
D _{zl} - Profundidade da Zona Eólica (m):	<input type="text" value="0.30"/>	
Módulo Erro Relativo (dec):	<input type="text" value="0.01"/>	
N - Número de pontos na vertical:	<input type="text" value="10"/>	
Número de iterações para cálculo (1-365):	<input type="text" value="365"/>	
Q _v - "Vazio Vertical" (m³/s):	<input type="text" value="0.0007"/>	
Critério para Determinação do Termoclima <input checked="" type="radio"/> Gradiente de densidade (Automático) <input type="radio"/> Diferença de Temperatura <input type="radio"/> Gradiente de Temperatura		Critério de Cálculo do Fator de Mistura <input type="radio"/> Média Aritmética das horas do Sol acima do horizonte <input type="radio"/> Média Aritmética das horas do Sol abaixo do horizonte <input checked="" type="radio"/> Média Aritmética das 24 Horas
Método Numérico para Cálculo <input checked="" type="radio"/> Heun <input type="radio"/> Runge-Kutta - 4a ordem Número de iterações por hora: <input type="text" value="1"/> (Passo = 3600 s)		

FIGURA 6.8: Tela para especificação das propriedades do líquido da lagoa e dos parâmetros de cálculo

O módulo Propriedades da Simulação, mostrado na FIGURA 6.8 permite que sejam fixados o erro máximo relativo admissível para cálculo do perfil zero, o número de pontos na vertical para cálculo do perfil de temperatura, o número de dias para cálculo, o critério para determinação da termoclina e o método numérico a ser utilizado para o cálculo das EDO para determinação dos perfis de temperatura. Além disso, esse módulo permite que seja escolhido a equação para cálculo da temperatura superficial da água, assim como o critério a ser utilizado para o cálculo do volume útil da lagoa.

As FIGURAS 6.9 e 6.10 mostram as telas de apresentação dos resultados simulados: variação da energia térmica líquida, variação do volume útil e do número de Froude para o período de cálculo indicado, assim como o perfil horário de temperatura.

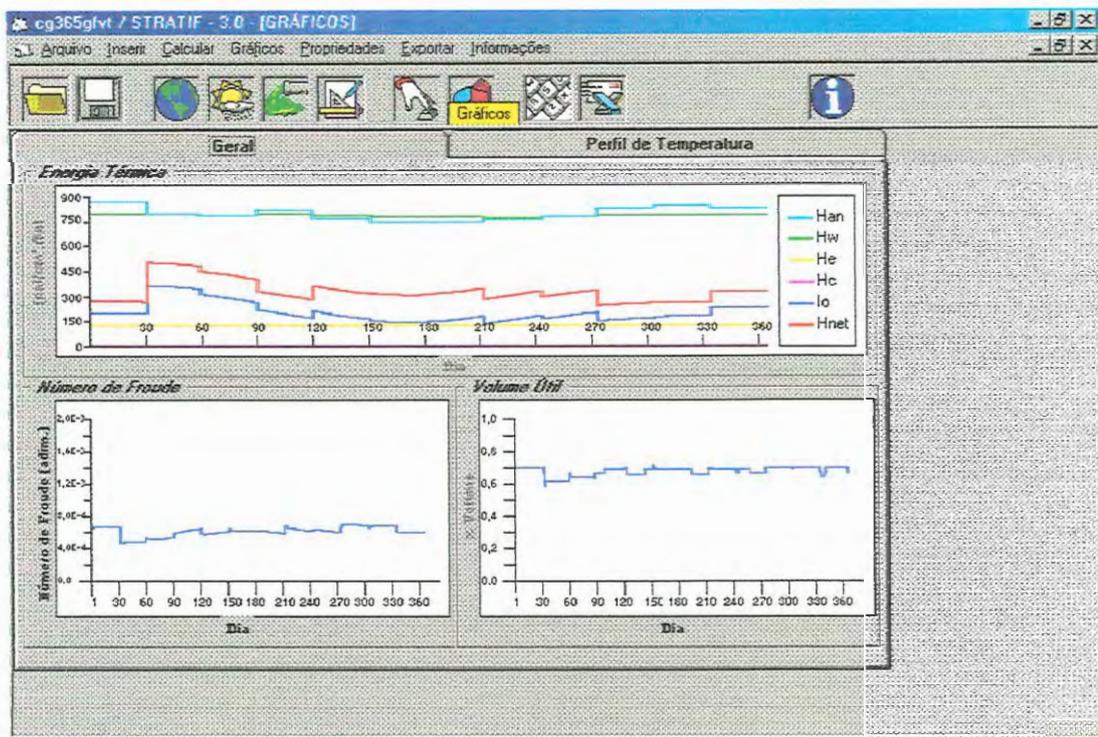


FIGURA 6.9: Tela gráfica de saída dos dados referente às variações da energia térmica disponível, número de Froude e volume útil da lagoa

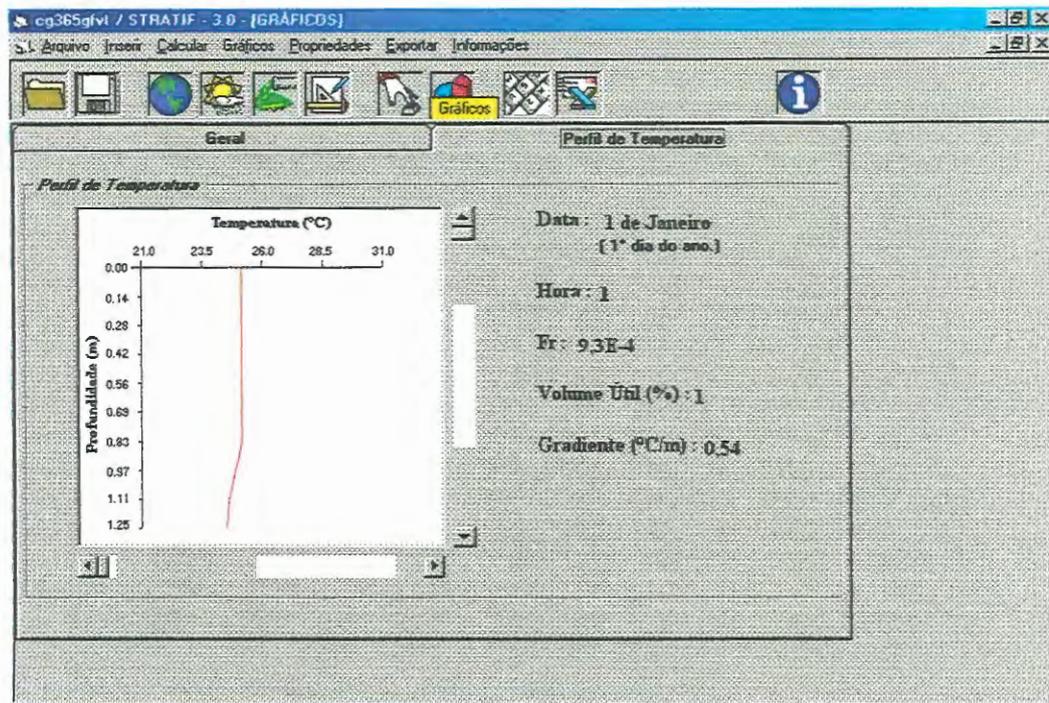


FIGURA 6.10: Tela para saída gráfica do perfil vertical de temperatura para um determinado dia e hora.

7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 – Conclusões

- ✓ As condições climáticas juntamente com a localização geográfica das lagoas de estabilização influenciam o fluxo de energia térmica incidente sobre sua superfície afetando o comportamento hidráulico dessas unidades de tratamento.
- ✓ A estratificação térmica pode alterar o volume útil das lagoas de estabilização afetando assim o tempo de detenção hidráulico das lagoas de estabilização. Dessa maneira, propõe-se a correção do tempo de detenção hidráulico teórico afim de garantir o tempo necessário para que a depuração dos esgotos seja compatível com o previsto no dimensionamento.
- ✓ Lagoas de estabilização com pequenas áreas superficiais e, conseqüentemente menores tempo de detenção hidráulico, conduzem à situações de melhor aproveitamento do seu volume físico, em relação à lagoas com maiores tempo de detenção.
- ✓ O critério de Gradiente de temperatura, com valores entre $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$ e $0,8^{\circ}\text{C}/\text{m}$, forneceu bons resultados como parâmetro para verificação da ocorrência de estratificação térmica em lagoas de estabilização localizadas em regiões de clima tropical.
- ✓ O número de Froude mostrou ser um bom indicador da estratificação térmica, sendo que para valores muito próximos a zero ocorre condição de estratificação térmica e, para valores elevados ocorre a condição de mistura vertical da massa líquida.

- ✓ O comportamento hidrodinâmico das lagoas de estabilização está intimamente relacionado com o fator *Comprimento (L) / Largura (W)*, no entanto, a variação do tempo de detenção hidráulico pode produzir alterações no número de Reynolds e com isso, mascarar os valores do número de dispersão.
- ✓ O modelo para cálculo do perfil de temperatura apresentou bons resultados, tendo os resultados simulados variado de $\pm 15\%$ dos valores experimentais utilizados nas comparações.
- ✓ Os modelos computacionais para cálculo do perfil de temperatura e para estimação do tempo de detenção hidráulico teórico devem ser testados e validados para outras lagoas, afim de confirmar sua precisão e acuracidade.

7.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

- Validar o modelo proposto para outras localidades;
- Realizar ensaios com traçadores para analisar a variação do volume útil da lagoa;
- Incorporar ao modelo proposto procedimento para variação horária da profundidade do disco de Secchi;
- Avaliar o perfil de salinidade e sólidos dissolvidos ao longo da profundidade das lagoas de estabilização e, se necessário, incorporar ao modelo sua influência na variação da massa específica da água;
- Estudar outros indicadores de estratificação do volume líquido;
- Avaliar experimentalmente a variação da difusão ao longo da profundidade da massa líquida, e incorporá-la ao modelo proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARCEIVALA, J.S. (1983). Hydraulic Modeling for Waste Stabilization Ponds. *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, v.109, n.1, p.265-268.
2. AGUNWAMBA, J.C.; EGBUNIWE, N. ADEMILUYI, J.O. (1992). Prediction of the Dispersion Number in Waste Stabilization Ponds. *Wat. Res.*, v.26, n.1, p.85-89.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1991) *Projeto de Norma para projeto hidráulico-sanitário de lagoas de estabilização*. Minuta de Projeto. Rio de Janeiro.
4. BOYCE, W.E; DIPRIMA, R.C. (1988). *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*. 3ª ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara.
5. BRACHO, N.; ALDANA, G.; CÁRDENAS, C. (1998). Influencia de la hidrodinamica del fluido en la eficiencia de lagunas de estabilizacion. In: XXVI CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. Lima, 1998. *Anais*. Peru. 3p.
6. CEBALLOS, B.S.O.; SOUZA, Maria do Socorro de; KONIG, A. (1997). Influência da Biomassa Algal nas Flutuações da Qualidade da Coluna de Água e do Efluente Final no Ciclo Diário de uma Lagoa Facultativa Primária. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. *Anais*. p.12-19.
7. CHAPRA, S.C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. Ed. WCB/McGraw-Hill. Lecture 31, p.577-589.
8. CHU, C.R.; SOONG, C.K. (1997). Numerical Simulation of Wind-Induced Entrainment in a Stably Stratified Water Basin. *Journal of Hydraulic Research*, v.35, n.1, p.21-41.
9. CUNHA, C. (1993). *Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas*. Campinas, Editora da UNICAMP.
10. CURTIS, T.P.; MARA, D.D.; DIXO, N. G. H.; SILVA, S. A. (1992) The effect of sunlight on faecal coliforms in ponds: implications for research and design *Wat. Sci. Tech.*, v.26, n.7-8, p.1729-1738.
11. DAVIDSON, J.H.; ADAMS, D.A.; MILLER, J.A. (1994). A coefficient to characterize mixing in solar water storage tanks. *Journal of Solar Energy Engineering*, v.116, p.94-99.
12. DOR, I; FURER, O.; ADIN, A.; BEN-YOSEF, N. (1993). Turbidity Related to Surface Temperature in Oxidation Ponds: Studies Toward Development of a Remote Sensing Method. *Wat.Sci.Tech.*, v.27, n.7-8, pp.37-44.

13. ESTEVES, F. de A. (1988). *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro, Editora Interciência.
14. FERNÁNDEZ, Adela; TEJEDOR, Carmen; CHORDI, Andrés. (1992) Effect of different factors on the die-off of fecal bacteria in a stabilization pond purification plant. *Wat. Res.*, v.26, n.8, p.1093-1098.
15. FERRARA, R.A.; HARLEMAN, D.R.F. (1981). Hydraulic Modeling for Waste Stabilization Ponds. *J. Envir. Eng. Div.*, ASCE. Vol. 107, N.EE4, p. 817-830.
16. FORERO, R.S. (s.d.). Consideraciones en relacion con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales. *Hojas de Divulgación Técnica*. CEPIS/HPE/OMS. 16p. (www.cepis.org.pe).
17. FORERO, R.S. (1986). Aspectos de construccion y operacion que requieren de investigacion. In: SEMINARIO REGIONAL DE INVERTIGACION SOBRE LAGUNAS DE ESTABILIZATION, Lima, 1986. *Anais*. Lima, Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente. P.119-137.
18. FORERO, R.S. (1987). Prediccion de la calidade del efluente en lagunas de estabilizacion. *Hojas de Divulgación Técnica*. CEPIS/HPE/OMS. 13p. (www.cepis.org.pe/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt038.html)
19. FRITZ, J.J.; MEREDITH, D.D.; MIDDLETON, A.C. (1980). Non-Steady State Bulk Temperature Determination for Stabilization Ponds. *Wat.Res.*, V.14, p.413-420.
20. GARG, H.P.; DATTA, Gouri. (1993). Fundamentals and Characteristics of Solar Radiation. *Renewable Energy*. vol 3.N 4-5, p.305-319.
21. GU, Ruochuan; LUCK, Frederick N.; STEFAN, Heinz G. (1996). Water Quality Stratification in Shallow Wastewater Stabilization Ponds. *Wat.Res.Bull.*, v.32, n.4, p.831-844.
22. HALLIDAY, D.; RESNICK, R. (1986). *Fisica*. 4ªed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v.4.
23. HAMON, R.W.; WEISS, L.L.; WILSON, W.T. (1954). Insolation as an empirical function of daily sunshine duration. *Monthly Weather Review*. v.82, p.141-146.
24. HARLEMAN, Donald R. F. (1975). *Transport processes in water quality control*. A series of notes to accompany lectures in 1.77 - Water Quality Control. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. s.p.
25. HOLMAN, J.P. (1983). *Transferência de Calor*. Ed. McGraw-Hill. 639p.
26. HUBER, W.C.; HARLEMAN, D.R.F.; JIRKA, G.H. (1972). Temperature prediction in stratified reservoirs. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol 98, N. HY4, pp.645-667.
27. INSTITUTO ASTRONÔMICO E GEOFÍSICO (1985). *Anuário Astronômico 1985*. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo. 280p.
28. JIRKA, G.H, ASCE, A.M.; HARLEMAN, R.F.; ASCE, M. (1979). Cooling impoundments: Classification and analysis. *Journal of the Energy Division* v.105, EY20. p.291-309.
29. JIRKA, G. H.; ASCE, A.M.; WATANABE, M. (1980). Thermal Structure os Cooling Ponds. *Journal of the Hydraulics Division - HY5 - May*. 1980. p.701-715.

30. KAMIYAMA, Hissashi. (1989) Lagoa anaeróbia: teorias e práticas operacionais. *Revista DAE*, v.49, n.155, p.71-79.
31. KAWAI, H. YANO, T. ROCHA, M.J.M.; SCHENEIDERMAN, B. (1981). Estabelecimento de Critérios para Dimensionamento de Lagoas de Estabilização. *Revista DAE*, Ano XLI, n.127, p.37-45.
32. KELLNER, E. (1996). *Lagoas de Estabilização Empregadas no Tratamento de Esgotos Sanitários: Revisão Analítica-Descritiva*. São Carlos. 371p. Dissertação (Mestrado) - Departamento Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
33. KELLNER, E.; PIRES, E.C. (1998) *Lagoas de estabilização: Projeto e Operação*. Rio de Janeiro, ABES. 241p.
34. KELLNER, E.; PIRES, E.C. (1999) Desenvolvimento de modelo matemático para determinação do perfil vertical de temperatura e do volume útil de lagoas de estabilização. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, Vol. 4, N. 1-2, p.84-92.
35. KENNEDY, R.E. (1949). Computation of Dailly Insolation Energy. *Bull. Am. Met. Soc.*, v.30. p.208-213.
36. KONIG, Anemarie (1990). Biologia das lagoas: Algas In: MENDONÇA, Sérgio Rolim (1990). *Lagoas de Estabilização e Aeradas Mecanicamente: Novos Conceitos*. João Pessoa. 388p
37. KONIG, Annemarie; CEBALLOS, Beatriz Susana Ovruski de; FLORENTINO, Ilma Queiroz de Barros; FREITAS, Vera Lúcia Bezerra de. (1991) Avaliações do ciclo diário de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em um sistema de lagoas de estabilização em escala real. In: 16º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Goiânia, 1991, *Anais*. Rio de Janeiro, ABES. v.2, tomo I, p.20-36.
38. LEVENSPIEL, O. (1974). *Engenharia das Reações Químicas* V.2. Cálculo de Reatores. São Paulo. Editora Edgard Blucher Ltda.
39. LLORENS, M.; SÁEZ, J.; SOLER, A. (1992). Influence of thermal stratification on the behaviour of a deep wastewater stabilization pond. *Wat. Res.*, v.26, n.5, p.569-577.
40. MAHAN, B.H. (1988). *Química: um curso universitário*. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda. 2ª ed.
41. MENDES, B.S.; do NASCIMENTO, M.J.; PEREIRA, M.I.; BAILEY, G.; LAPA, N.; MORAIS, J.; OLIVEIRA, J.S. (1995). Efficiency of Removal in Stabilization Ponds I: Statistical Analysis of K Values. *Wat. Sci. Tech.*, v.31, n.12, p.231-238.
42. METCALF & EDDY, Inc. (1991) *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*. 3 ed. New York, McGraw-Hill.
43. NAMÉCHE, T.; VASSEL, J.L. (1996). New method for studying the hydraulic behaviour of tanks in series: Application to aerated lagoons and waste stabilization ponds. *Wat. Sci. Tech.*, v.33, N. 8, pp.105-124.
44. NAKAI, J.; MAYOR, M. S.; NADUR, S. E.; HIRATA, D.; CALDAS, J. R. F. (1998) Determinação do Tempo de Detenção Hidráulico - ETE Piratininga. In: ANAIS DO IX ENCONTRO TÉCNICO. SABESP. São Paulo, 1998. *Anais*. São Paulo, Associação dos Engenheiros da SABESP, 1998.

45. NORTON, W.R.; KING, I.P. (1974). Mathematical simulation of water temperature to determine the impact of raising an existing dam. In: SCHETZ, J. A. ed. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. Martin Sumnerfield. Series Editor. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. v.36, p.53-70.
46. ORAGUL, J.J.; CAWLEY, L.; ARRIDGE, H.M.; MARA, D.D.; PEARSON, H.W.; SILVA, S.A. (1995). Removal Kinetics in a Tropical Experimental Waste Stabilization Ponds in Relation to Organic Loading, Retention Time and Pond Geometry. In: 3rd IAWQ INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP: Waste Stabilization Ponds, Technology and Applications. João Pessoa, 1995. *Anais*. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba, 1995.9p.
47. ORLOB, G.T. (1983). One-dimensional models for simulation of water quality in lakes and reservoirs. In: ORLOB, G.T. ed. *Mathematical modeling of water quality: Streams, lakes and reservoirs*. New York, John Wiley & Sons. p.227-273.
48. PEARSON, H. W.; KONIG, A. (1986) The biology of waste stabilization pond systems. In: SEMINARIO REGIONAL DE INVESTIGACION SOBRE LAGUNAS DE ESTABILIZACION, Lima, 1986. *Anais*. Lima, Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente. p. 26-39.
49. PEARSON, H. W.; MARA, D.D.; MILLS, S.W.; SMALLMAN, D.J. (1987) Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. *Wat. Sci. Tech.*, v.19, n.12, p. 145-152.
50. PEARSON, H.W.; MARA, D.D.; ARRIDGE, H.A. (1995). The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilization pond performance and efficiency. *Wat. Sci. Tech.*, v.31, n.12, p.129-139.
51. PEDAHZUR, R.; NASSER, A.M.; DOR, I.; FATTAL, B.; SHUVAL, H.I. (1993). The effect of baffle installation on the performance of a single-cell stabilization pond. *Wat. Sci. Tech.*, v.27, n.7-8, p.45-52.
52. POLPRASERT, C.; AGARWALLA, B.K. (1994). A Facultative Pond Model Incorporating Biofilm Activity. *Wat. Envir. Res.*, v.66, n.5., p.725-732.
53. POLPRASERT, C.; DISSANAYAKE, M.G.; THANH, N.C. (1983). Bacterial Die-off Kinetics in Waste Stabilization Ponds. *J. Wat. Poll. Contr. Fed.*, v.55, n.3, p.285-296.
54. PORTO, M. F. do A. (1991). *Sensibilidade de Modelos de Estratificação Térmica em Reservatórios a dados de Radiação Solar*. São Paulo. 204p. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
55. PREUL, H.C.; WAGNER, R.A. (1987). Waste Stabilization Pond Prediction Model. *Wat. Sci. Tech.*, v.19, n.12, p.205-211.
56. RIGHETTO, A.M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos, EESC/USP.
57. RIGO, D.; TEIXEIRA, E.C. (1995). Emprego de Traçadores no Projeto e Otimização de Unidades de Tratamento de Água e Efluentes. In: 18^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Salvador, 1995, *Anais*. Rio de Janeiro, ABES.
58. RYAN, P.J.; STOLZENBACH, K.D. (1972). Engineering Aspects of Heat Disposal from Power generation. *Mass.Inst.Techl.*

59. SAQQAR, M.M.; PESCOD, M. B. (1992) Modelling coliform reduction in wastewater stabilization ponds *Wat. Sci. Tech.*, v. 26, n.7-8, p.1667-1677.
60. SARIKAYA, H.Z.; SAATCI, A.M. ABDULFATTAH, A.F. (1987). Effect of Pond Depth on Bacterial Die-Off. *J. Envir.Eng.*, v.113, n.6, p.1350-1362.
61. SILVA, S.; MARA, D. D.. (1979) *Tratamentos biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização*. Rio de Janeiro, ABES.
62. SILVA, S. A. S. (1982). *Tratamento de esgotos domésticos em lagoas de estabilização no nordeste do Brasil*. Escócia. 249p. Tese (Doutorado). Tradução. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Dundee.
63. SPIGEL, R.S.; IMBERGER, J. (1980). The Classification of Mixed-Layer Dynamics in Lakes of Small to Medium Size. *J. Physical Oceanography*, v.10, p.1104-1121.
64. SWINBANK, W.C. (1963). Long Wave Radiation from Clear Skies. *Q.J.Roy. Met. Soc. Lond.* v.89.
65. TEIXEIRA, E.C. (1995). Importância da Hidrodinâmica de Reatores na Otimização de Processos de Desinfecção de Águas de Abastecimento-Uma Análise Crítica. In: 18º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Salvador, 1995, *Anais*. Rio de Janeiro, ABES.
66. THACKSTON, E.L.; SHIELDS JR., D.; SCROEDER, P.R. (1987). Residence Time Distributions of Shallow Basins. *J. Envir. Eng.*, v.113, n.6, December, p.1319-1332.
67. THIRUMUTHI, D. (1969). Design Principles of Waste Stabilization Ponds. *J. Sanit. Eng. Div.*, ASCE, April, p.311-330.
68. THOMPSON, R.O.R.Y.; IMBERGER, J. (1980). Response of a Numerical Model of a Stratified Lakes to Wind Stress. *Proc. 2nd. Int. Symp. On Stratified Flows*, Trondheim, Norway. Pp.562-570.
69. TORRES, J.J.; SOLER, A.J.; ORTUNO, J.F. (1997). Hydraulic Performance of a Deep Wastewater Stabilization Pond. *Wat.Res.*, v.31, n.4. pp.679-688.
70. TORRES, J.J.; SOLER, A.J.; SÁEZ, J.; LLORENS, M. (2000). Hydraulic Performance of a Deep Wastewater Stabilization Pond Fed at 3,5m Depth. *Wat.Res.*, v.34, n.3. pp.1042-1049
71. TROXLER, R.W; THACKSTON, E.L. (1977). Predicting the rate of warming of Rivers Below Hydroelectric Installations. *J. Water Pollut. Contr. Fed.* v.49, p.1902-1912.
72. VANZO, José Everaldo. (1990) *Importância da mistura em lagoas de estabilização*. 12p. / Apresentado no curso sobre Técnicas de Tratamento de Esgotos na Superintendência da SABESP de Presidente Prudente, Presidente Prudente/
73. VIDAL, W. L. (1983) Aperfeiçoamentos hidráulicos no projeto de lagoas de estabilização, visando redução da área de tratamento: uma aplicação prática. In: 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, *Anais*. Balneário de Camburiú. CETESB, São Paulo. 38p.
74. YANEZ, F.C. (1986). Reduccion de Organismos Patogenos y Diseño de Lagunas de Estabilizacion en Países en Desarrollo. In: SEMINARIO REGIONAL DE INVESTIGACION SOBRE LAGUNAS DE ESTABILIZATION, Lima, 1986. *Anais*. Lima, Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente. P.40-88.

APÊNDICE I

(Entrada de Dados para as Simulações dos Perfis de Temperatura)



Local: Campina Grande (PB)

Latitude (°): -7,2167

Longitude (°): -35,8675

Altitude (m): 550

Comprimento (m): 25,70

Largura (m): 7,40

Profundidade (m): 1,25

Vazão Média (m³/h): 1,34

Temperatura Média (°C): 24

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média do ar (°C)	24,4	24,0	23,1	23,7	22,5	21,3	21,3	20,7	21,1	22,2	22,9	23,1
Horas de Insolação no mês	281	165	178	204	165	164	160	195	185	249	244	225
Cobertura do céu (dec.)*	1,00	0,69	0,74	0,85	0,69	0,68	0,67	0,81	0,87	1,00	1,00	0,94
Velocidade do vento (km/h)**	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Umidade Relativa do ar (dec.)**	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Fonte: SILVA (1982)

* Valores calculados considerando 12h de insolação teórica para cada dia.

** Valores estimados.

Coefficiente de Difusão Vertical (m²/s): 1E-12

Profundidade do Disco de Secchi (m): 0,30

Profundidade da Zona Fótica (m): 0,90



Local: Santa Fé do Sul (SP)

Latitude (°): -20,7675

Longitude (°): -50,933

Altitude (m): 402

Comprimento (m): 80,00

Largura (m): 66,00

Profundidade (m): 1,50

Vazão Média (m³/h): 12

Temperatura Média (°C): 23

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média do ar (°C)	24,8	24,9	24,9	23,2	21,4	20,6	20,7	22,8	23,2	24,6	24,4	24,7
Cobertura do céu (dec.)	0,23	0,25	0,25	0,30	0,29	0,26	0,30	0,26	0,22	0,29	0,29	0,21
Velocidade do vento (km/h)*	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Umidade Relativa do ar (dec.)	0,79	0,78	0,78	0,75	0,72	0,78	0,68	0,63	0,64	0,68	0,73	0,78

Fonte: VIDAL (1983)

* Valores estimados.

Coefficiente de Difusão Vertical (m²/s): 1E-12

Profundidade do Disco de Secchi (m): 0,30

Profundidade da Zona Fóptica (m): 0,90