

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Odinei Fogolari

**DESINFECÇÃO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO EM  
REATOR COM AQUECIMENTO SOLAR**

Florianópolis, SC  
2011



ODINEI FOGOLARI

**DESINFECÇÃO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO EM  
REATOR COM AQUECIMENTO SOLAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sérgio Philippi

Florianópolis, SC  
2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

F656d Fogolari, Odinei

Desinfecção de lodo de tanque séptico em reator com aquecimento solar [dissertação] / Odinei Fogolari ; orientador, Luiz Sérgio Philippi. -Florianópolis, SC, 2011.

151 p.: il., grafs., tabs., mapas

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

1. Engenharia ambiental. 2. Saneamento descentralizado. 3. Reator com aquecimento solar. 4. Desinfecção de lodo. 5. Inativação térmica. I. Philippi, Luiz Sergio. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

CDU 628.4

**ODINEI FOGOLARI**

**DESINFECÇÃO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO EM  
REATOR COM AQUECIMENTO SOLAR**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “**MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL**”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de março de 2011.

---

Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
(Coordenador)

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Luiz Sérgio Philippi, Dr.  
Orientador

---

Prof. Narciso A. Ramos Arroyo, Dr.  
Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.  
Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



*À Cris, dedico.*

*“Sem a convicção de uma harmonia íntima do Universo não poderia haver ciência. Esta convicção é, e continuará a ser, a base de toda criação científica. Em toda a extensão de nossos esforços, nas lutas dramáticas entre as velhas e as novas concepções, entrevemos a ânsia eterna de compreensão, a intuição inabalável da harmonia universal, que se robustece na própria multiplicidade dos obstáculos que se oferecem ao nosso entendimento.”*

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho só foi possível graças à contribuição de diversas pessoas e instituições. Se algo foi construído, de certo houve a manifestação de esforços e o desprendimento de energias de diversas fontes. Enumerá-las todas seria impossível, mas cabe deixar os sinceros agradecimentos a aqueles que foram fundamentais neste percurso:

Ao Prof. Dr. Luiz Sérgio Philippi, pela orientação, compreensão, apoio e confiança, o que foi essencial para realização do mestrado.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Narciso A. Ramos Arroyo (EMC/UFSC); Prof. Dr. Paulo Belli Filho (ENS/UFSC) e ao Prof. Dr. Flávio Rubens Lapolli (ENS/UFSC), por terem aceitado o convite e pelas valiosas sugestões.

A todos do grupo GESAD, especialmente à Maria Elisa, Daniel, Carla, Tuti, aos bolsistas Caio, Sandra e Djesser, pelo auxílio, pelas idéias e principalmente pela amizade, todos foram fundamentais na realização desse trabalho.

A todos os professores e funcionários que integram o Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFSC.

Ao Prof. Dr. Paulo José Ogliari (INE/UFSC), pela atenção e auxílio no tratamento dos dados.

Ao Prof. Dr. Pedro E. D. Augusto (COTUCA/UNICAMP), pela atenção e sugestões na condução dos testes de inativação térmica.

Ao Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza (EQA/UFSC), por ceder gentilmente o laboratório – LABMASSA para realização dos testes de inativação térmica.

Ao Seu Hélio, por nos auxiliar nas diversas emergências de campo e na instalação dos componentes experimentais.

Aos colegas estudantes da pós-graduação, pelos momentos vivenciados ao longo desse curso.

Ao amigo Eliton Fontana pelo auxílio no uso do *Mathematica*.

Aos meus Professores da graduação, em especial ao Prof. Dr. Jacir Dal Magro (Unochapecó) e ao Prof. Dr. Adriano Cancelier (UFSJ), pelos ensinamentos e incentivo, além das orientações nos trabalhos de iniciação científica.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especialmente ao Coordenador Solismar Damé Prestes e ao Meteorologista Custodio

Simonetti, pela atenção e por disponibilizar gentilmente dados de irradiação solar e insolação de Florianópolis.

À EPAGRI, por ceder o espaço para instalação dos experimentos. Ao pessoal do CETRE, especialmente ao Seu Dequinha, pelo auxílio e suporte na área experimental.

Ao CIRAM/EPAGRI, especialmente a Sra. Vera Lúcia pela atenção e por disponibilizar gentilmente dados meteorológicos de 2007, 2008 e 2009.

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido.

À FUNASA pelo financiamento do projeto “Tratamento de lodo de esgoto sob a ótica do saneamento descentralizado”, do qual fez parte esse trabalho, e por apoiar a pesquisa em saneamento no país.

Agradeço de forma especial...

Aos meus avós Pedro e Tereza (*in memorian*), que sempre foram fonte de inspiração, e me apoiaram em tudo.

Ao meu irmão Hoilson Fogolari, pelos conselhos, motivação e ajuda nos mais diversos momentos.

Aos meus pais Ivo Fogolari e Salete Maria Fossá Fogolari, pelo carinho, apoio e constante incentivo.

À minha querida esposa Crisleine Zottis dos Reis, por todo amor, dedicação, compreensão e apoio, que tem sido fundamental em todos os aspectos da minha vida.

Odinei

## RESUMO

Uma parcela considerável da população no Brasil utiliza sistemas descentralizados de tratamento de esgoto. O lodo produzido nesses sistemas possui grande carga de microrganismos patogênicos e precisa ser gerenciado de forma adequada. O tratamento descentralizado de lodo pode ser uma alternativa eficiente e acessível a toda população, contribuindo na melhoria das condições de saneamento. A desinfecção do lodo fornece um produto mais seguro para o manuseio, reciclagem agrícola ou mesmo para tratamentos de estabilização posteriores. Este trabalho tem como objetivo avaliar um reator de desinfecção térmica de lodo, utilizando energia solar. O experimento está instalado na cidade de Florianópolis/SC. O processo ocorre em batelada. O lodo é aquecido através de um trocador de calor, construído com tubos de cobre e instalado dentro do reator, onde circula água aquecida em coletores solares planos. Foram realizados 20 ensaios experimentais ao longo de dezembro/2009 e julho/2010. O volume de lodo tratado foi fixado em 200 L e o tempo de tratamento em 8 h, sempre com início às 09h00min e término às 17h00min, a fim de se verificar as influências meteorológicas no processo. Amostras de lodo foram coletadas durante o tratamento para análises microbiológicas. Os principais indicadores do tratamento foram *Escherichia coli* e coliformes totais, além da temperatura do lodo. O processo mostrou-se eficiente para ensaios realizados com irradiação solar média do período acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , onde a eliminação microbiana foi considerável e evitou reaparecimento microbiano na maioria das amostras. Nesses ensaios a temperatura do lodo ficou acima de  $53^{\circ}\text{C}$  por pelo menos três horas. Os ensaios realizados em dias com menores índices de radiação solar ficaram comprometidos pelas baixas temperaturas. Paralelamente aos ensaios no reator, os parâmetros cinéticos de inativação térmica da *E. coli* foram determinados em laboratório pelo método do frasco de três bocas. O valor encontrado para energia de inativação ( $E_d$ ) foi  $2,48 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$ , o tempo de redução decimal ( $D_T$ ) à  $55^{\circ}\text{C}$  foi de  $3,61 \pm 0,14 \text{ min}$  e o coeficiente térmico ( $z$ )  $8,3^{\circ}\text{C}$ . Com base nesses parâmetros, a inativação térmica no reator foi avaliada através do modelo cinético de primeira ordem em condições não isotérmicas, e os resultados comparados com os valores experimentais. O modelo mostrou-se satisfatório na predição dos dados.

**Palavras-chaves:** saneamento descentralizado, reator com aquecimento solar, desinfecção de lodo, inativação térmica, *E. coli*.

## ABSTRACT

A considerable portion of the population in Brazil use decentralized sewage treatment systems. The sludge produced in these systems have a high load of pathogenic microorganisms and must be managed properly. The decentralized treatment of the sludge can be an effective alternative and is accessible to all people, contributing to improved sanitation conditions. The disinfection of the sludge provides a safer product for handling, agricultural recycling or for later stabilization treatment. The aim of this study is to evaluate a thermal disinfection reactor for sludge, using solar energy. The experiment is installed in the city of Florianópolis /SC. The process occurs in batches. The sludge is heated through a heat exchanger built with copper pipes and installed inside the reactor, where water heated in flat plate solar collectors circulates. Twenty experimental tests were performed during the period from December/2009 to July/2010. The volume of treated sludge was fixed at 200 L and a treatment time of 8 hours, always starting at 09:00am and ending at 5:00pm, in order to verify the meteorological influences on the process. Sludge samples were collected during treatment for microbiological analysis. The principal treatment indicators were *Escherichia coli* and total coliforms, as well as the temperature of the sludge. The process proved effective in tests with an average solar irradiation period of  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , where microbial elimination was considerable, preventing regrowth after 24 hours in most of the samples. In these tests the temperature of the sludge stayed above  $53^{\circ}\text{C}$  for at least three hours. Tests conducted on days with lower levels of solar irradiation were compromised by the low temperatures. Parallel to the tests in the reactor, the *E. coli* kinetic parameters of thermal inactivation were determined in a laboratory using the three-neck flask method. The inactivation energy ( $E_d$ ) value found was  $2.48 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$ , the decimal reduction time ( $D_T$ ) at  $55^{\circ}\text{C}$  was  $3.61 \pm 0.14 \text{ min}$  and the thermal coefficient ( $z$ ) was  $8.3^{\circ}\text{C}$ . Based on these parameters, the thermal inactivation in the reactor was evaluated using the first order kinetic model in non isothermal conditions, and the results compared with experimental values. The model proved satisfactory in the prediction of the data.

**Key Words:** Decentralized sanitation, solar-heated reactor, disinfection of sludge, thermal inactivation, *E. coli*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Determinação gráfica do valor de $D_T$ a uma dada temperatura.....	43
Figura 02: Determinação gráfica do valor de $z$ .....	44
Figura 03: Inclinação do eixo da terra, movimento de translação, solstícios e equinócios.....	46
Figura 04: Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre.....	47
Figura 05: Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar em condições atmosféricas médias, orientada para o zênite.....	48
Figura 06: Irradiação solar global diária – média anual típica.....	54
Figura 07: Movimento aparente do sol em torno da terra em uma perspectiva anual num ponto do Hemisfério Sul.....	56
Figura 08: Fluxograma do processo de desinfecção do lodo em batelada.....	63
Figura 09: Reator de desinfecção de lodo.....	64
Figura 10: (a) Esquema da tubulação no coletor solar; (b) coletores solares implantados na área experimental.....	66
Figura 11: Detalhes do trocador de calor.....	68
Figura 12: (a) Bomba de circulação de água nos coletores solares; (b) controlador; (c) termômetro digital.....	69
Figura 13: Localização dos termopares dentro do reator.....	71
Figura 14: Dados médios de irradiação solar coletados no ano de 2007, 2008 e 2009 na estação meteorológica do INMET em São José na Grande Florianópolis/SC.....	75
Figura 15: Curvas de inativação térmica da <i>Escherichia coli</i> em lodo de esgoto a 45°C, 50°C, 55°C, 60°C e 65°C, realizadas em duplicada (◇ repetição 1; Δ repetição 2).....	83

Figura 16: Obtenção das constantes de inativação $E_d$ e $C$ para <i>E. coli</i> em lodo de esgoto. ....	85
Figura 17: Curva de destruição térmica da <i>E. coli</i> em lodo de esgoto. .	88
Figura 18: Estimativa das relações tempo-temperatura para redução de 6 (seis) unidades logarítmicas de <i>E. coli</i> em lodo de esgoto.....	89
Figura 19: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e a temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 03, 07 e 20/dez e 16/jan.....	93
Figura 20: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 23 e 30/jan e 06 e 20/fev.....	93
Figura 21: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 13 e 27/mar e 11 e 17/abr. ....	94
Figura 22: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 01e 09/mai e 05 e 12/jun.....	94
Figura 23: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 27/jun e 03, 25 e 31/jul. ....	95
Figura 24: Inativação de <i>E. coli</i> (redução de unidades logarítmicas) nos ensaios realizados em dias com céu aberto ao longo do ano, e a irradiação solar média incidente no período de cada ensaio. ....	98
Figura 25: Inativação de coliformes totais (redução de unidades logarítmicas) nos ensaios realizados em dias com céu aberto ao longo do ano, e a irradiação solar média incidente no período de cada ensaio....	99
Figura 26: Comparação da inativação de <i>E. coli</i> (redução de unidades log.) nos ensaios realizados em dias com céu aberto e dias com céu encoberto entre dez/09 a abr/10, e a respectiva irradiação solar média incidente no período de cada ensaio.....	102
Figura 27: Comparação da inativação de coliformes totais (redução de unidades log.) nos ensaios realizados em dias com céu aberto e dias com céu encoberto entre dez/09 e abr/10, e a respectiva irradiação solar média incidente no período de cada ensaio.....	103

Figura 28: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para <i>E. coli</i> nos ensaios com irradiação solar média acima de $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .....	105
Figura 29: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para <i>E. coli</i> nos ensaios com irradiação solar média abaixo de $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .....	109
Figura 30: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para coliformes totais nos ensaios com irradiação solar média acima de $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .....	110
Figura 31: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para coliformes totais nos ensaios com irradiação solar média abaixo de $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .....	110
Figura 32: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 03/dez.....	112
Figura 33: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 30/jan.....	112
Figura 34: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 12/jun.....	113
Figura 35: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 27/jun.....	114
Figura 36: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 16/jan.....	115
Figura 37: Curva de inativação térmica da <i>E. coli</i> obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 27/mar.....	115
Figura 38: Valores observados experimentalmente <i>versus</i> valores obtidos pelo modelo na inativação de <i>E. coli</i> para ensaios realizados em 03/dez; 30/jan; 12/jun e 27/jun (céu aberto).....	117

Figura 39: Valores observados experimentalmente *versus* valores obtidos pelo modelo na inativação de *E. coli* para ensaios realizados em 16/jan e 27/mar (céu encoberto)..... 118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Características físico-químicas de lodos de tanques sépticos.....	28
Tabela 02: Tempo de sobrevivência de patógenos em solos e plantas..	34
Tabela 03: Monitoramento do tratamento de esgoto com base na concentração de <i>E. coli</i> para várias categorias de aplicação do efluente.....	36
Tabela 04: Distribuição espectral da radiação solar extraterrestre.....	47
Tabela 05: Caracterização físico-química do lodo de esgoto do tanque séptico.....	81
Tabela 06: Taxa de inativação térmica da <i>Escherichia coli</i> ( $k_d$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio padrão para cada temperatura.....	84
Tabela 07: Valores de $D_T$ para cada temperatura e seu respectivo desvio padrão.....	86
Tabela 08: Tempos de redução decimal ( $D_T$ ) para <i>E. coli</i> em diferentes trabalhos.....	87
Tabela 09: Coeficiente térmico ( $z$ ) para <i>E. coli</i> em diferentes trabalhos.....	88
Tabela 10: Estatísticas descritivas dos dados de irradiação solar (em $W.h.m^{-2}$ ) em cada ensaio.....	90
Tabela 11: Insolação (h) e temperatura média do ar ( $^{\circ}C$ ) para o período de realização dos ensaios.....	92
Tabela 12: Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado aos dados de temperatura do lodo (em Kelvin), erro-padrão e o coeficiente de determinação para cada ensaio.....	96
Tabela 13: Avaliação de modelo de inativação térmica para <i>E. coli</i> . Valores do coeficiente angular, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de variância (%V) para os resultados do modelo <i>versus</i> dados experimentais em cada ensaio.....	119

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Classes de lodo de esgoto.....	36
Quadro 02: Parâmetros físico-químicos e seus respectivos métodos de análise utilizados na caracterização do lodo de esgoto .....	59
Quadro 03: Data e condição meteorológica em cada ensaio.....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CETRE	Centro de Treinamento/EPAGRI
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina/EPAGRI
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GESAD	Grupo de Estudo em Saneamento Descentralizado
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LABMASSA	Laboratório de Transferência de Massa/UFSC
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente/UFSC
TDT	<i>Thermal death time</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
U.S.EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_o$	Assíntota inferior	
$A_f$	Assíntota superior	
$C$	Constante de inativação térmica	( $\text{min}^{-1}$ )
$c_p$	Calor específico	( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ )
$D$	Tempo de redução decimal	(min)
$\text{DBO}_5$	Demanda bioquímica da Oxigênio	( $\text{mg.L}^{-1}$ )
$DP$	Desvio padrão	
$\text{DQO}$	Demanda química de oxigênio	( $\text{mg.L}^{-1}$ )
$d_x$	Inclinação da curva	
$E_d$	Energia de inativação	( $\text{J.mol}^{-1}$ )
$M$	Massa	(kg)
Máx.	Máximo	
Mín.	Mínimo	
$k_d$	Taxa de inativação térmica	( $\text{min}^{-1}$ )
$N$	Concentração de células viáveis	(NMP/ml ou NMP/g de ST)
$\text{NH}_4^+$	Íon amônio	( $\text{mg.L}^{-1}$ )
NMP	Número Mais Provável	
NTK	Nitrogênio total Kjeldahl	( $\text{mg.L}^{-1}$ )
$p$	Número de observações	
$P$	Número de termos/variáveis no modelo	
pH	Potencial hidrogeniônico	
$P$ total	Fósforo total	( $\text{mg.L}^{-1}$ )
$Q$	Energia térmica	(MJ)

R	Constante dos gases ideais	(J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup> )
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação	
ST	Sólidos totais	(mg.L <sup>-1</sup> )
STV	Sólidos totais voláteis	(mg.L <sup>-1</sup> )
T	Temperatura	(°C)
T <sub>K</sub>	Temperatura em kelvin	(K)
T <sub>ar</sub>	Temperatura do ar	(°C)
t	Tempo	(min)
UFF	Unidade formadora de floco	
UFP	Unidade formadora de placa	
%V	Porcentagem de variância	%
x <sub>o</sub>	Ponto de inflexão da curva	
z	Coefficiente térmico	(°C)

#### Subscritos

o	Inicial
f	Final
r	Recrescimento microbiano
min.	Mínimo
Obs.	Observado; referente ao T <sub>médio</sub> obtido com os valores observados/ medidos experimentalmente
sup.	Superfície

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	25
2.1 OBJETIVO GERAL .....	25
2.1.1 Objetivos Específicos.....	25
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	26
3.1 TANQUES SÉPTICOS E GERAÇÃO DE LODO.....	26
3.1.1 Aspectos Gerais e o Funcionamento de Tanques Sêpticos.....	26
3.1.2 Características Físico-Químicas do Lodo de Esgoto....	27
3.1.3 Características Microbiológicas do Lodo de Esgoto....	29
3.2 DESINFECÇÃO DE LODO DE ESGOTO COM TRATAMENTO TÉRMICO.....	35
3.3 CINÉTICA DE INATIVAÇÃO TÉRMICA DE PRIMEIRA ORDEM.....	41
3.4 ENERGIA SOLAR .....	45
3.4.1 A Radiação Solar .....	45
3.4.2 A Medição da Radiação Solar.....	50
3.4.3 Aproveitamento Térmico da Energia Solar – Coletores Solares.....	51
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	58
4.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA .....	58
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO.....	59
4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA E PARÂMETROS CINÉTICOS DE INATIVAÇÃO DA <i>Escherichia coli</i> .....	60
4.3.1 Preparação do Inoculo.....	60
4.3.2 Procedimento de Inativação Térmica.....	60

4.3.3	Análise dos Dados.....	61
4.4	PROCESSO DE DESINFECÇÃO TÉRMICA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR.....	62
4.4.1	Configuração do Sistema .....	62
4.4.2	Componentes do Sistema .....	64
4.4.3	Construção e Implantação .....	72
4.4.4	Operação.....	72
4.4.5	Parâmetros de Análises e Monitoramento.....	75
4.4.6	Recrescimento Microbiano .....	76
4.4.7	Procedimento Experimental dos Ensaio no Reator.....	77
4.4.8	Dados meteorológicos.....	77
4.4.9	Predição da Inativação Térmica da <i>Escherichia coli</i> no Reator com Aquecimento Solar.....	78
4.4.10	Análise dos Resultados.....	79
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>81</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO LODO DE ESGOTO.....	81
5.2	RESISTÊNCIA TÉRMICA E PARÂMETROS CINÉTICOS DE INATIVAÇÃO DA <i>Escherichia coli</i> EM LODO DE ESGOTO .....	82
5.3	AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO DO LODO UTILIZANDO ENERGIA TÉRMICA DE COLETORES SOLARES PLANOS .....	89
5.3.1	Condições Meteorológicas.....	89
5.3.2	Temperatura do Lodo.....	92
5.3.3	Eficiência do Processo na Desinfecção de Lodo ao Longo do Ano.....	97
5.3.4	Eficiência do Processo na Desinfecção do Lodo em Dias com Céu Encoberto.....	101
5.3.5	Recrescimento Microbiano .....	104

5.4	PREDIÇÃO DA INATIVAÇÃO TÉRMICA DE <i>Escherichia coli</i> NO REATOR COM AQUECIMENTO SOLAR ATRAVÉS DO MODELO CINÉTICO DE PRIMEIRA ORDEM.....	111
5.4.1	Avaliação do Modelo.....	116
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	121
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	123
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	124
	APÊNDICES.....	133
	APÊNDICE A: Sólidos totais, sólidos totais voláteis e pH do lodo de esgoto utilizado em cada ensaio.....	134
	APÊNDICE B: Dados de irradiação solar para o dia de cada ensaio no reator.....	135
	APÊNDICE C: Logaritmos das concentrações de <i>E. coli</i> e coliformes totais antes e após o tratamento térmico .....	137
	APÊNDICE D – Predição da inativação térmica da <i>E. coli</i> dos ensaios não apresentados no item 5.4 dos resultados. ....	139
	APÊNDICE E – Temperaturas do lodo ( $T_{\min}$ , $T_{\sup}$ , $T_{\text{meio}}$ e $T_{\text{médio}}$ ) obtidas em cada ensaio. ....	144
	APÊNDICE F – Estimativa do número de pessoas que poderiam ser atendidas pelo sistema de desinfecção de lodo com energia solar. .	150

## 1. INTRODUÇÃO

Uma alternativa em discussão para o problema da disposição do lodo de esgoto é a reciclagem agrícola. De acordo com Andreoli, Lara e Fernandes (2001), o uso de lodo na agricultura possibilita o biociclo de nutrientes minerais, fornece matéria orgânica, micro e macro nutrientes, além de atuar como condicionador do solo.

Embora os benefícios ambientais e agrícolas da reciclagem de lodo sejam consideráveis, ela deve ser realizada de forma segura. A higienização do lodo antes da sua utilização é essencial, pois agentes patogênicos como os ovos de helmintos, esporos de fungos, vírus e colônias de bactérias tendem a sedimentar com o esgoto e se concentrar no lodo. Esses agentes devem ser reduzidos a níveis seguros, através de processos de desidratação, estabilização e desinfecção (BARROS; COSTA; ANDREOLI, 2007; WHO, 2006).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou a Resolução nº 375 em 2006 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto. Nesta resolução é estabelecido no Art. 3º, que lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processos de redução de patógenos e da atratividade de vetores. No Anexo 1 da mesma resolução, são sugeridos processos de redução significativa (necessários para a obtenção de lodos de esgoto classe B) e de redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto classe A). Entre os processos de redução adicional de patógenos está o tratamento térmico e a pasteurização.

A higienização do lodo, ou seja, a redução adicional de patógenos permite a obtenção de um produto mais seguro tanto para manuseio, quanto para a utilização nas diversas culturas vegetais. O Art. 11º da Resolução nº 375 estabelece requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto para uso agrícola. Os principais parâmetros a serem atendidos são níveis de substâncias inorgânicas como metais pesados, substâncias orgânicas tóxicas e de agentes patogênicos, principalmente coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus.

O tratamento térmico é muito utilizado na inativação microbiana em diversos produtos e vem sendo cada vez mais pesquisado e usado na desinfecção de lodo de esgoto (MOCÉ-LLIVINA *et al.*, 2003; LANG e SMITH, 2008). O desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento da energia solar permite a exploração de recursos térmicos para diversos

fins de forma sustentável. O sistema de tratamento de lodo proposto nesse trabalho faz uso de um arranjo que utiliza coletores solares planos para aquecer o lodo e praticamente não tem custos de operação, minimizando os custos energéticos.

O modelo se destina a localidades servidas prioritariamente com tanques sépticos ou outros processos descentralizados de tratamento de esgotos. A gestão de lodos produzidos nesses sistemas geralmente é deficiente, podendo gerar diversos problemas de contaminação ambiental e de saúde pública. A desinfecção do lodo seria um passo adiante para reduzir os riscos associados a esse produto e para inseri-lo com mais segurança em programas de reciclagem agrícola, visto que é uma fonte rica em nutrientes para o solo.

O uso de uma tecnologia com energia solar reduz consideravelmente os custos ambientais do tratamento e do produto final, além de aumentar sua qualidade. O sistema constitui num arranjo simples, de fácil manuseio, baixo custo de operação e pode ser apropriado para o uso em pequenas comunidades, grupos de famílias ou pequenas cidades que utilizam sistemas descentralizados para tratamento do esgoto.

A pesquisa foi financiada pela Fundação Nacional da Saúde (FUNASA) e faz parte de um projeto intitulado “*Alternativas de gerenciamento seguro de lodos de esgotos sob a ótica do saneamento descentralizado*”, aprovado no edital de pesquisa 001/2007.

As pesquisas financiadas pela FUNASA fazem parte do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, cujas áreas temáticas são as próprias ações da Fundação. Tais ações obedecem a critérios epidemiológicos, relacionados à promoção da saúde e do saneamento, sobretudo em municípios de pequeno porte e em áreas especiais como aldeias indígenas, quilombolas e assentamentos (FUNASA, 2009).

Este trabalho foi desenvolvido pelo Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O grupo desenvolve pesquisas visando alternativas de saneamento acessíveis a toda população. Já foram desenvolvidas diversas pesquisas envolvendo filtros plantados com macrófitas, filtros de areia, estudos relativos à segregação de águas, tanques sépticos, lodo de esgoto e educação ambiental.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a desinfecção de lodo de tanque séptico em reator com aquecimento utilizando energia térmica de coletores solares planos.

#### 2.1.1 Objetivos Específicos

- a) Determinar a resistência térmica e parâmetros cinéticos de inativação da *E. coli* em lodo de esgoto.
- b) Verificar a eficiência do tratamento térmico em batelada com aproveitamento da energia solar na desinfecção do lodo quanto à remoção de *Escherichia Coli* e coliformes totais.
- c) Avaliar os efeitos dos índices de irradiação solar no processo, considerando suas variações ao longo do ano e em períodos com o céu encoberto.
- d) Monitorar o possível recrescimento de microrganismos no lodo após o tratamento térmico.
- e) Avaliar a cinética de inativação térmica da *E. coli* no reator com aquecimento solar.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 TANQUES SÉPTICOS E GERAÇÃO DE LODO

##### 3.1.1 Aspectos Gerais e o Funcionamento de Tanques Sépticos

O tratamento de esgoto concentra e remove a matéria orgânica e outros poluentes dando origem ao lodo de esgoto. As características físico-químicas e microbiológicas do lodo dependem do tipo de esgoto e do tratamento empregado. Geralmente os efluentes são classificados como doméstico e industrial. Os esgotos domésticos são constituídos essencialmente de despejos produzidos nas residências, uma parcela de águas pluviais, além de águas de infiltração (ANDREOLI, 1999).

Tecnologias simples como tanques sépticos podem ser uma opção adequada para gestão de efluentes desde que sejam projetados de acordo com a demanda e tenham a manutenção adequada. Apesar da simplicidade dessas tecnologias, a retirada do lodo deve ser periódica e sistemática, o que nem sempre é realizado na prática, e acaba sendo vetor de doenças, gera mau cheiro e contamina o ambiente.

O lodo acumulado nos diversos sistemas de tratamento de esgoto deve ser submetido a processos de transformação que o façam atender as diretrizes e normas de preservação ambiental. É comum a prática da estabilização do lodo por meio do fenômeno natural da mineralização da matéria orgânica. O processo de estabilização tem como objetivo principal a conversão parcial da matéria putrescível em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma destruição de microrganismos patogênicos, assim como a redução do sólido seco do lodo (JORDÃO; PESSOA, 1995).

O destino final do lodo proveniente das fossas e tanques sépticos representa um grave problema que ainda não recebeu a devida atenção. As estimativas de produção são de cerca de 80.000 m<sup>3</sup>/dia de lodo séptico úmido no Brasil (ANDREOLI e POMPEO, 2009).

O número de pessoas atendidas por sistemas individuais de tratamento de esgoto como fossas e tanques sépticos é considerável. Em 2008, apenas 52,5% dos domicílios em território nacional possuíam rede coletora de esgoto, independente de possuir tratamento ou não. As demais residências utilizavam fossas sépticas, fossas rudimentares,

outras formas de tratamento descentralizado, ou simplesmente não tratavam seus dejetos. (IBGE, 2008).

O tanque séptico é definido pela NBR 7229, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993), e o seu funcionamento envolve três etapas principais:

- *Retenção*: o esgoto é retido no tanque por um período preestabelecido que pode variar de 12 a 24 horas, dependendo das contribuições do afluente.
- *Decantação*: sedimentação de 60% a 70% dos sólidos em suspensão, formando o lodo. Parte dos sólidos não decantados, formados por óleos, graxas, gorduras e outros materiais misturados com gases são retidos na superfície do líquido, denominado espuma.
- *Digestão*: tanto o lodo como a espuma são atacados por bactérias anaeróbias. Neste processo, a estabilização biológica do lodo irá acontecer em quatro etapas chamadas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

Como o processo de digestão ocorre na maior parte na ausência de oxigênio, prevalecem os mecanismos anaeróbios de degradação da matéria orgânica, no qual há uma complexa e delicada relação entre os microrganismos responsáveis por esta conversão, onde deve haver um equilíbrio entre cada etapa para que o processo ocorra com eficiência (CHERNICHARO, 1997).

Tratamentos anaeróbios são amplamente utilizados também para estabilizar lodos de tratamento de águas residuais. O principal objetivo da digestão anaeróbia de lodos é a degradação e destruição de substâncias orgânicas, com conseqüente redução de agentes patogênicos. Esta conversão é catalisada por um grande número de bactérias que operam em sinergia, catalisando diferentes reações químicas (TOMEI; BRAGUGLIA; MININNI, 2008).

### 3.1.2 Características Físico-Químicas do Lodo de Esgoto

As características físico-químicas de lodos de esgotos podem variar consideravelmente de acordo com a procedência do esgoto bruto, hábitos da população, localidade, tratamento, entre outros. A Tabela 01

mostra a caracterização de alguns parâmetros físico-químicos realizada por autores no Brasil e no mundo em lodos de tanques sépticos.

Tabela 01: Características físico-químicas de lodos de tanques sépticos.

Referências	Parâmetros físico-químicos <sup>1</sup> (mg.L <sup>-1</sup> )						P total
	ST	STV	DQO	DBO <sub>5</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NTK	
Philippi (1992)	36.570 - 46.400	25.810 - 31.570	2.502 - 3.873	-	-	-	-
Koottatep <i>et al.</i> , (2007)	2.200 - 67.000	848 - 52.362	1.200 - 76.000	600 - 5.500	120 - 1.200	300 - 5.000	-
Heinss <i>et al.</i> (1999)	11.900	-	7.800	600 - 1.500	-	-	-
U.S.EPA (1999)	1.132 - 130.475	353 - 71.402	1.500 - 703.000	404 - 78.600	3 - 116	66 - 1.060	20 - 760
Koné; Strauss, (2004)	6.000 - 35.000	-	4.200	750 - 2.600	150	-	-
Klingel (2001)	15.350	-	15.700	2.300	415	-	-
Metcalf & Eddy (1991)	5.000 - 100.000	-	2.400 - 16.000	1.020 - 4.800	38 - 149	55 - 180	6 - 67
Belli Filho <i>et al.</i> (2007)	7.186	3.413	6.199	1.890	58	-	90
Meneses <i>et al.</i> (2001)	12.880	3.518	6.895	2.434	89	120	18

Os principais riscos de poluição associados ao lodo de esgoto são devidos aos organismos patogênicos e os componentes químicos tóxicos presentes, que muitas vezes atingem níveis que comprometem a saúde humana e ambiental como um todo.

Os compostos químicos tóxicos incluem metais e compostos orgânicos complexos. Os metais acumulam-se no ambiente e podem causar sérios danos em longo prazo. Entre os elementos encontrados em lodos de esgoto com maiores potenciais de risco estão o Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Selênio e Zinco. A Resolução nº 375/2006 do CONAMA (BRASIL, 2006), em seu art. 11, estabelece limites máximos desses metais em lodo de esgoto ou produtos derivados para uso agrícola.

Com relação aos compostos orgânicos complexos, as principais substâncias potencialmente tóxicas que podem ser encontradas em lodos de esgoto, incluem benzenos clorados, fenóis, hidrocarbonetos

<sup>1</sup> ST: sólidos totais; STV: sólidos totais voláteis; SST: sólidos suspensos totais; DQO: demanda química de oxigênio; DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: nitrogênio amoniacal; NTK: nitrogênio total Kjeldahl; P total: fósforo total.

aromáticos policíclicos, poluentes orgânicos persistentes (ex. aldrin, Dicloro-Difenil-Tricloroetano, Bifenil policlorados, dioxinas, furanos, etc.), ésteres e fenóis. Geralmente as concentrações são mais elevadas quando há despejo de efluentes industriais. Os riscos associados a esses compostos dependem da dinâmica específica de cada um no ambiente, através das interações físicas, químicas e biológicas que podem ocorrer.

### 3.1.3 Características Microbiológicas do Lodo de Esgoto

A potencialidade de riscos biológicos associado ao lodo de esgoto é considerável, principalmente se ele for utilizado ou descartado inadequadamente, podendo representar uma questão de saúde pública. Os possíveis problemas de poluição podem ser devidos à contaminação de águas superficiais e subterrâneas, contaminação do solo e plantas, ingestão por animais ou pelo homem de alimentos contaminados, e contaminação em humanos pelo manuseio do material (WHO, 2006).

De acordo com Silva *et al.* (2001), é possível encontrar cinco grupos de microrganismos no lodo, sendo eles: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. A presença destes organismos também está condicionada às condições sócio-econômicas e sanitárias da população, à região geográfica e principalmente ao tipo de tratamento que o lodo foi submetido.

As doenças mais relevantes relacionadas também diferem conforme esses parâmetros, em especial, com as condições de saneamento e higiene da área. Os agentes causais (vírus, bactérias, protozoários e helmintos patogênicos) dessas doenças são liberados pelo corpo da pessoa infectada através da urina e fezes. Em locais onde a higiene e as normas sanitárias são deficientes, os helmintos intestinais geralmente apresentam maiores riscos à saúde (WHO, 2006).

A seguir uma breve descrição dos agentes microbiológicos mais preocupantes encontrados em esgotos domésticos. Alguns deles são utilizados como indicadores da qualidade de águas, alimentos e do tratamento de efluentes.

- Bactérias:

As bactérias são organismos procariontes, unicelulares e não possuem membrana nuclear. Considerando a grande diversidade desses organismos, pode-se dizer que a maioria delas não são patogênicas ao homem. Dentre as mais utilizadas como indicadores da qualidade de

água e do tratamento de esgoto, estão as bactérias coliformes e as do gênero *salmonella*.

Os coliformes são definidos como bactérias tipo bastonetes gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, não formadores de endósporos, e que fermentam a lactose para formar gás em 48 horas após terem sido colocados em caldo lactosado a 35°C (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005). As principais bactérias que fazem parte dos coliformes totais são as dos gêneros *Citrobacter*, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*.

Os coliformes podem ser comumente encontrados em amostras de plantas, solo, no trato gastrointestinal de humano e de animais de sangue quente. Por isso, a utilização dos coliformes totais como indicador de contaminação fecal é limitado, algumas espécies podem ocorrer no ambiente naturalmente (FRANCO e LANDGRAF, 1996).

Muitos padrões utilizados em alimentos, águas e efluentes especificam a identificação de coliformes fecais, também chamados de termotolerantes, pois são capazes de fermentar a lactose com produção de gás em 24 horas em uma temperatura de 44,5 – 45,5°C.

A bactéria mais abundante nos coliformes fecais é a *Escherichia coli* (*E. coli*), que é um dos habitantes mais comum do trato gastrointestinal humano e tem se tornado uma ferramenta importante para a pesquisa básica. Sua presença em águas e nos alimentos é um indicador de contaminação fecal. Normalmente não é patogênica. Entretanto, pode causar infecções do trato urinário, e certas linhagens produzem enterotoxinas que causam diarreia e ocasionalmente causam doenças graves de origem alimentar, provocadas por algumas linhagens como a *E. coli* O157:H7 (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Alguns métodos de detecção de coliformes são baseados na habilidade desses organismos fermentarem lactose. O método dos tubos múltiplos pode ser utilizado para estimar o número de coliformes pelo número mais provável (NMP). O método de filtração em membrana é mais direto para determinação da presença e do número de coliformes. Esse método é apropriado para águas de baixa turvação que não obstruem o filtro e apresentam relativamente poucas bactérias não-coliformes que possam mascarar os resultados.

Recentemente um método enzimático foi desenvolvido, o qual é mais conveniente na detecção de coliformes, especialmente do coliforme fecal *E. coli*. O método utiliza um meio de cultura que contém dois substratos o-nitrofenil- $\beta$ -D-galactopiranosídeo (ONPG) e 4-metilumbeliferil- $\beta$ -D-glucuronídeo (MUG). Os coliformes produzem

a enzima  $\beta$ -galactosidase que atua sobre o ONPG e forma uma coloração amarela, indicando sua presença na amostra. Já a *E. coli* é a única entre os coliformes que produz a enzima  $\beta$ -glicoronidase, que atua sobre o MUG formando um composto fluorescente que possui um brilho azul quando exposto a luz ultravioleta de comprimento de onda longo (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Esse método é vantajoso perante aos demais, pois além de detectar os coliformes totais, permite detectar apenas a *E. coli* dentre as demais bactérias. E ainda podem ser aplicados em meios sólidos, como no método de filtração em membrana, onde as colônias fluorescem sob a luz ultravioleta.

No que se refere à *salmonella*, quase todos os membros desse gênero são patogênicos. Elas são habitantes comuns do trato gastrointestinal de vários animais, principalmente aves domésticas e bovinos. Em condições de higiene precária podem contaminar alimentos. A nomenclatura desse gênero difere um pouco das demais. A *Salmonella* infecciosa para animais de sangue quente é considerada, por razões práticas, como a espécie *Salmonella entérica*. Esta possui diversos sorotipos, como a *Salmonella typhimurium*, que não é uma espécie e a maneira mais correta de chamá-lo seria *Salmonella entérica* sorotipo *typhimurium*. No entanto, para evitar confusão, é comum os sorotipos receberem o nome como se fossem espécies.

A febre tifóide é a doença mais grave causada por membros desse gênero, a *Salmonella typhi*. Outra doença gastrointestinal comum é a salmonelose, frequentemente associada a infecções de origem alimentar (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Além dessas bactérias, outras podem estar presentes em esgotos *Shigella sp.*, *Yersinia sp.*, *Vibrio cholerae*, *Compylobacter jejuni*. As principais doenças associadas são diarreias, gastroenterite aguda e cólera (KOWAL, 1985; U.S.EPA, 2003 ).

- Vírus

Os vírus não são considerados organismos vivos porque são inertes fora das células dos hospedeiros. No entanto, quando a penetram, o ácido nucléico viral torna-se ativo ocorrendo a multiplicação viral. Portanto, dependendo do ponto de vista, os vírus podem ser considerados uma agregação complexa de elementos químicos ou, um microrganismo vivo.

Os vírus são caracterizados por serem agentes infecciosos extremamente pequenos (20 a 1000 nm) e parasitas intracelulares obrigatórios. As características que o distinguem estão relacionadas com sua organização estrutural simples e seu mecanismo de multiplicação. Os vírus não possuem, ou possuem poucas enzimas próprias para seu metabolismo. Por isso se apropriam da estrutura metabólica da célula hospedeira. Eles podem infectar células de invertebrados, vertebrados, plantas, protistas, fungos e bactérias, sendo este último chamado de bacteriófago (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

A principal forma de transmissão de vírus é por contato, mas também podem estar presentes em águas e alimentos contaminados. Os principais vírus entéricos são: Hepatite A, Hepatite E, Rotavírus, Enterovírus (Poliovírus, Coxsackievírus, Echovírus), Reovírus, Astrovírus, Calicevírus, Norwalk, Adenovírus. Entre as principais doenças associadas aos vírus entéricos, está a poliomielite, paralisia, meningite, pneumonia, diarreia, febre, hepatite infecciosa, gastroenterite aguda e epidêmica, encefalite, infecção respiratória (KOWAL, 1985; U.S.EPA, 2003, WHO, 2006)

- Helminthos

Helminthos são animais eucarióticos multicelulares que geralmente possuem sistema digestivo, circulatório, nervoso, excretor e reprodutivo. Alguns parasitas passam grande parte de suas vidas, senão toda, hospedados em humanos. A maioria pertence a dois filos: Plathelminthos (vermes achatados) e Nematoda (vermes arredondados) (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Para viver dentro do hospedeiro, precisam ser altamente especializados. Seu ciclo de vida é complexo, envolve uma sucessão de hospedeiros intermediários para a conclusão de cada estágio larval do parasita e um hospedeiro definitivo para o parasita adulto.

Os Plathelminthos incluem as classes dos trematodas e dos cestodas. Os trematodas apresentam corpos achatados em forma de folha com uma ventosa ventral e uma anal. Obtém alimentos por absorção direta. Recebem nomes de acordo com o tecido do hospedeiro definitivo em que o adulto vive (ex. verme de pulmão, fígado, do sangue). Os cestodas, também chamados de tênias, são parasitas intestinais, e possuem ventosas para sua fixação na mucosa intestinal do hospedeiro definitivo.

Os nematelmintos (membros do filo Nematoda) são cilíndricos e achatados em cada uma das extremidades. Algumas espécies passam o

ciclo de vida inteiro (de ovo a adulto) em um único hospedeiro. Os que infectam humanos podem ser divididos em duas categorias: aqueles em que o ovo é infectivo e aqueles em que a larva é infectiva. *Ascaris lumbricoides* é um nematoda grande (30 cm de comprimento) que infecta através dos ovos mais de um bilhão de pessoas no mundo inteiro. A prevenção dessa contaminação é feita por meio do saneamento básico (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Além do *Ascaris lumbricoides*, os helmintos frequentemente encontrados em esgotos domésticos ou lodos são *Ascaris suum*, *Trichuris trichiura*, *Taenia saginata*, *Toxocara canis*, *Taenia solium*, *Necator americanus*, *Hymenolepis nana*. As doenças associadas incluem ascaríase, dores abdominais, ancilostomose, teníase, distúrbios digestivos, anorexia, insônia, emagrecimento, febre e sintomas neurológicos (KOWAL, 1985; U.S.EPA, 2003).

- Protozoários

São organismos unicelulares, eucarióticos e quimio-heterotróficos pertencentes ao Reino Protista. Os protozoários habitam a água e o solo, no estágio vegetativo se alimentam de bactérias e pequenas partículas nutrientes. Alguns fazem parte da microbiota normal dos animais. Dentre as quase 20.000 espécies conhecidas, poucas causam doenças. Em certas condições adversas, alguns protozoários produzem uma cápsula protetora denominada cisto. Este pode sobreviver em situações de escassez de água, nutrientes e oxigênio, quando a temperatura não é suportável, ou quando há presença de compostos químicos tóxicos (TORTORA, FUNKE E CASE, 2005).

Entre os principais protozoários encontrados no esgoto e lodo estão, *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolítica*, *Balantidium coli*, *Toxoplasma gondii*, *Cryptosporidium*. As doenças associadas a esses agentes são gastroenterite aguda, diarreia e disenteria, toxoplasmose, giardíase e amebíase (KOWAL, 1985; U.S.EPA, 2003).

No ambiente a sobrevivência dos microrganismos patógenos varia conforme a espécie e as condições às quais ele está submetido, como incidência da radiação solar, pH, temperatura ambiente, presença de inibidores entre outros. Em geral, o número desses microrganismos tende a diminuir com o tempo. A Tabela 02 apresenta a estimativa de sobrevivência em solo e plantas das principais classes de microrganismos encontrados no lodo de esgoto.

Tabela 02: Tempo de sobrevivência de patógenos em solos e plantas.

Patógenos	Solo	Plantas
Bactérias	2 meses - 1 ano	1 mês - 6 meses
Vírus	3 meses - 1 ano	1 mês - 2 meses
Protozoários	2 dias - 10 dias	2 dias - 5 dias
Helmintos	2 anos - 7 anos	1 mês - 5 meses

Fonte: Kowal (1985).

De acordo com Bonnet, Lara e Domaszak (1998), processos de desidratação, estabilização e desinfecção podem inativar grande parte dos microrganismos presentes no lodo. No entanto, para fins de utilização desse material é necessário o monitoramento dessa carga microbiana. Embora ainda não seja viável economicamente a análise rotineira de todos os parâmetros, é possível a seleção de alguns organismos indicadores, visto que a sua resistência pode ser comparada com os demais grupos.

Os indicadores devem ser detectados rapidamente, facilmente quantificados e devem possuir características de sobrevivência semelhantes à de outros grupos de patógenos de interesse. A *Escherichia Coli* (bactéria de origem fecal) é um parâmetro que se mostra cada vez mais adequado para a indicação de material fecal na amostra. Inclusive frente a outros parâmetros como coliformes totais e mesmo coliformes termotolerantes, que devem ser empregados com critérios e ressalvas (BASTOS *et al.*, 2000; ROSE e GRIMES, 2001).

Entre os principais organismos indicadores do tratamento de lodo, destacam-se os grupos de bactérias coliformes, estreptococos fecais e *salmonella* (principalmente *Escherichia coli* e as do gênero *Salmonella*), além do grupo dos helmintos, nematóides e cestóides (*Ascaris lumbricoides*). As bactérias, apesar de frágeis à maioria dos tratamentos de estabilização do lodo, podem apresentar certa resistência ao calor. Os helmintos, principalmente *Ascaris lumbricóides*, possuem ovos resistentes e capazes de sobreviver no solo por até sete anos.

A concentração de coliformes totais e termotolerantes em lodos de tanques sépticos geralmente fica na ordem de  $10^4$  a  $10^8$  NMP/100ml (INGUNZA *et al.*, 2009). De acordo com WHO (2006), o número de coliformes termotolerantes geralmente encontrados em efluentes domésticos varia de  $10^7$  e  $10^9$  NMP/100ml.

Para ovos de helmintos a variabilidade das amostras é maior, a concentração é expressa em ovos/L e é mais dependente das

características sanitárias da população, podendo estar ausente em algumas amostras e presente em outras, com valores na ordem de  $10^5$  ovos/L (INGUNZA *et al.*, 2009).

### 3.2 DESINFECÇÃO DE LODO DE ESGOTO COM TRATAMENTO TÉRMICO

De acordo com Andreoli, Lara e Fernandes (2001), o lodo de esgoto possui grande potencial para utilização na agricultura, na melhoria das condições do solo e no fornecimento de nutrientes. No entanto, o lodo concentra a maioria dos microrganismos presentes no esgoto sanitário, cuja contaminação é dependente das características sanitárias da população que o produz.

Entre as principais preocupações associadas ao uso de lodo de esgoto na agricultura está a transmissão de patógenos para alimentos ou trabalhadores rurais, a contaminação de águas subterrâneas e superficiais, além da acumulação de metais e contaminantes orgânicos (VENGLOVSKY; MARTINEZ E PLACHA, 2006).

Doenças relacionadas com excretas (urina e fezes) são transmissíveis e seus agentes causais (vírus, bactérias, protozoários e helmintos patogênicos) são liberados pelo corpo da pessoa infectada. Conforme já observado, as doenças diferem de acordo a região, dependem das condições de saneamento e higiene da área, além do nível do tratamento que o esgoto recebe antes de ser usado na agricultura ou lançado no ambiente.

Nos Estados Unidos, a *Environmental Protection Agency* (U.S.EPA, 2003), regulamenta o uso desse material no referido país, e define o termo “Biossólido” como sendo o lodo tratado, submetido às análises específicas descritas no documento e que se enquadra nas normas estaduais e federais para utilização. Ela classifica o lodo em duas categorias (Classe A e Classe B) de acordo com a qualidade do material tratado, e estabelece requisitos diferentes para cada uma delas.

No Brasil, a Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos, e também o classifica em duas categorias de acordo com as concentrações máximas de agentes patogênicos em cada uma delas (Quadro 01).

Classe do lodo	Concentração de agentes patogênicos
A	Coliformes Termotolerantes < 10 <sup>3</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo/g de ST
	<i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST
	Vírus < 0,25 UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes Termotolerantes < 10 <sup>6</sup> NMP/g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos/g de ST

Quadro 01: Classes de lodo de esgoto.

Fonte: Resolução nº 375/2006 do CONAMA; BRASIL (2006).

A Organização Mundial da Saúde estabeleceu diretrizes para a utilização de esgotos, excretas e águas cinza na agricultura. As orientações variam conforme a aplicação do dejetos e os níveis de segurança exigidos. Para helmintos é indicado que o esgoto contenha menos de 1 ovo/litro em todas as aplicações de irrigação. O número de *E. coli* pode ser usado para verificar se o tratamento do efluente está ou não atendendo os níveis de redução de patógenos requeridos, conforme expresso na Tabela 03 (WHO, 2006).

Tabela 03: Monitoramento do tratamento de esgoto com base na concentração de *E. coli* para várias categorias de aplicação do efluente.

Tipo de Aplicação	Categoria	Redução de patógenos requerida (unid. Log)	Monitoramento (nº de <i>E. coli</i> por 100 ml)	Observações
Sem restrições	A	4	$\leq 10^3$	Cultivo de raízes
	B	3	$\leq 10^4$	Cultivo de folhas
	C	2	$\leq 10^5$	Aplicação por gotejamento em culturas de alto crescimento
	D	4	$\leq 10^3$	Aplicação por gotejamento em culturas de baixo crescimento
	E	6 ou 7	$\leq 10^1$ ou $\leq 10^0$	Nível de verificação dependente de exigências de órgãos regulamentadores locais

*Continuação*

	F	4	$\leq 10^4$	Agricultura com mão-de-obra intensiva
Restrita	G	3	$\leq 10^5$	Agricultura altamente mecanizada
	H	0,5	$\leq 10^6$	Remoção de patógenos de um tanque séptico

Fonte: WHO (2006)

Muitas são as formas de estabilização e desinfecção do lodo de esgoto, os processos utilizados variam de acordo com a finalidade e exigências legais quanto ao produto final. As decisões devem ser tomadas levando em consideração os aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Fytily e Zabaniotou (2008) apresentam exemplos de processos eficazes freqüentemente utilizados na Europa para o tratamento de lodo, conforme segue:

- *Tratamento térmico*: mínimo de 20 minutos a 70°C ou 4 horas a 55°C seguido por digestão anaeróbia mesofílica.
- *Digestão anaeróbia mesofílica*: tempo médio de retenção de pelo menos 12 ou 24 dias de digestão primária em uma faixa de temperatura de 35±3 ou 25±3°C, respectivamente, seguido de um estágio de retenção de pelo menos 14 dias.
- *Digestão aeróbica termofílica*: tempo médio de digestão de até 7 dias. O lodo deve ser submetido a um mínimo de 55°C até que as reações se completem.
- *Compostagem*: o composto deve ser mantido a 40°C por pelo menos 5 dias, e ter atingido no mínimo 55°C por pelo menos 4 horas no centro da pilha, seguido de um período de maturação.
- *Caleação do lodo líquido*: adição de cal a fim de elevar o pH acima de 12 por pelo menos 2 horas.
- *Desidratação e armazenagem*: desidratação do lodo não tratado e armazenamento por um período mínimo de três meses.

Dentre os processos vistos que podem ser utilizados para redução de microrganismos patogênicos, temos a inativação térmica. O calor é

um dos métodos mais empregados para matar microrganismos. Estes são considerados mortos quando perdem de forma irreversível a capacidade de se multiplicar. Os microrganismos morrem pela desnaturação de proteínas na presença de calor úmido, ou por oxidação, quando se trata de calor seco. Quando uma população microbiana é aquecida, a redução do número de organismos viáveis ocorre de forma exponencial, no entanto, há variações de resistência de organismo para organismo (ALTERTHUM e CARVALHAL, 1999).

Podemos destacar três parâmetros interessantes nesse processo: *ponto de morte térmica* (temperatura mais baixa capaz de matar todos os microrganismos de uma dada espécie, em suspensão, em 10 minutos); *tempo de morte térmica* (menor tempo capaz de matar todos os microrganismos, em suspensão, numa dada temperatura); e *tempo de redução decimal* ( $D_T$ ), relacionado com o grau de resistência ao calor (tempo expresso em minutos, no qual 90% da população é morta, numa dada temperatura ( $T$ )).

Ainda, de acordo com Alterthum e Carvalhal (1999), o termo desinfecção é definido pela destruição (morte) de microrganismos capazes de transmitir infecção (patógenos). Com a desinfecção o crescimento é reduzido ou inibido, no entanto, não ocorre necessariamente a esterilização (destruição de todas as formas de vida).

Os esporos bacterianos chamados endósporos e alguns cistos são, usualmente, os mais resistentes à temperatura, eles são formados como resultado de uma situação de estresse ao meio e possuem uma capa protéica como mecanismo de sobrevivência. Neste caso, para destruição desses organismos com calor úmido é necessária a esterilização (121°C, por 15 minutos).

Um processo de calor úmido muito empregado na desinfecção de diversos produtos é a pasteurização. Desenvolvido inicialmente por Louis Pasteur, o processo consistia em aquecer um produto a uma dada temperatura, num dado tempo, e a seguir resfriar bruscamente. A pasteurização ainda é muito empregada na desinfecção do leite, por exemplo, onde é aquecido a 72°C por 15 segundos, ou a 63°C por 30 minutos (ALTERTHUM e CARVALHAL, 1999).

De acordo com Haug (1993), uma sugestão de um processo semelhante à pasteurização para destruição de organismos encontrados no lodo, é tratá-lo por 30 minutos em 70°C. A norma americana (U.S.EPA, 2003), assim como a brasileira (BRASIL, 2006), faz referência a três processos que envolvem o tratamento de lodo por calor úmido:

a) Secagem direta ou indireta para reduzir a umidade do lodo a níveis iguais ou inferiores a 10%, sendo que o lodo deve alcançar no mínimo 80°C.

b) Tratamento térmico a 180°C ou mais, por 30 minutos.

c) Pasteurização, manutenção do lodo a uma temperatura mínima de 70°C, por pelo menos 30 minutos.

Arthurson (2008) observa que a pasteurização é um processo eficaz na eliminação da maioria dos patógenos em lodo de esgoto e deveria ser introduzida antes ou depois de processos de estabilização (ex. digestão ou compostagem) para obtenção de um produto adequado à utilização agrícola. No entanto, ressalta que o método pode falhar na eliminação de endósporo bacteriano, e também quanto à possibilidade de recrescimento microbiano ou de recontaminação no manuseio do produto. O processo pode ter um custo elevado, principalmente quando for utilizado vapor no aquecimento.

A relação tempo/temperatura para cada microrganismo é específica e a inativação pode ocorrer em temperaturas mais baixas que as citadas, porém, com acréscimos nos tempos de tratamento. Haug (1993) descreve diversas curvas de inativação térmica para microrganismos patogênicos freqüentemente encontrados em lodo de esgoto como Coliformes, *Salmonella enteritidis*, *streptococcus* e ovos de *Ascaris*.

Após a regulamentação do uso agrícola de lodo de esgoto em diversos países e os avanços na linha da compostagem, diversas pesquisas estão sendo realizadas visando tornar essa atividade mais segura, dentre elas, estão os estudos sobre desinfecção térmica de lodos.

Aitken *et al.* (2005), avaliando a inativação térmica de ovos de helmintos (*Ascaris suum*) em biossólido de um digestor contínuo, simularam condições de digestão anaeróbia em temperaturas de 49°C a 55°C, a fim de verificar o tempo de inativação sugerido pelo EPA (*Environmental Protection Agency*). O biossólido previamente inoculado foi tratado em um reator batelada (4,3-4,5 L) imerso em banho. A inativação ocorreu em condições isotérmicas e foi descrita com uma cinética de primeira ordem. Após 6 horas em 49°C não foram mais detectados ovos viáveis de *Ascaris suum*; em 51°C esse tempo foi reduzido para 2 horas e em 55°C a inativação até o nível mais baixo de detecção do método ocorreu em 0,5 horas. O tempo necessário à inativação completa do biossólido nas referidas temperaturas foi inferior

aos propostos pelo EPA/625/R-92/013 (referente à publicação de 1999), obtidos através da equação que relaciona tempo-temperatura para produção de lodo de esgoto classe A.

De acordo com Haug (1993), a destruição de ovos de *Ascaris lumbricoides* ocorreu após 60 minutos de tratamento em 50°C, e após 7 minutos em 55°C. Passamani, Keller, Gonçalves (2002) obtiveram inativação de 100% de ovos de helmintos e coliformes fecais em lodo de esgoto com 10%, 20% e 25% de ST, após tratamento térmico por 30 minutos em 70°C. Foi detectado recrescimento de coliformes após cinco dias do tratamento apenas na amostra com 25% de ST.

Em estudo sobre a inativação de ovos de *Ascaris suum* sob diferentes condições de temperatura, pH e concentração de amônia, Pecson *et al.* (2007), identificaram como sendo 110 minutos o tempo necessário para destruição de 99% dos ovos viáveis em amostra lodo de esgoto com 6% de ST, pH igual a 7, sem adição de amônia, e submetida à 50°C.

Simoneti (2006) estudou a cinética de inativação térmica de ovos de *Ascaris suum* em biossólido (aprox. 30 g/L de ST), utilizando reator batelada aquecido direta e indiretamente com vapor saturado. No experimento com aquecimento indireto (reator imerso em banho), não foram detectados ovos viáveis de *Ascaris* após 50 minutos de reação em 55°C. Em 60°C não foram detectados ovos viáveis em nenhum dos tempos amostrados, indicando uma rápida inativação. Devido à variabilidade dos dados, novos testes foram realizados com novos critérios de detecção, o qual apresentou desvios menores. Nestes, os valores para os tempos de redução decimal encontrados foram os seguintes:  $D_{50^{\circ}\text{C}} = 340$  min;  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 50$  min; e  $D_{60^{\circ}\text{C}} = 4,4$  min. A energia de inativação determinada foi de  $4,37 \times 10^5 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

Buscando parâmetros sobre a inativação térmica de microrganismos entéricos para avaliação de processos de tratamento de lodos de esgoto para aplicações agrícolas, Lang e Smith (2008), avaliaram a cinética de destruição de diversas cepas de *E. coli* e *Salmonella*, tanto em meio nutritivo como em esgoto bruto centrifugado. Todas as bactérias apresentaram maiores resistência ao calor quando imersas em caldo nutritivo. Para o tratamento utilizando esgoto como meio, a *E. coli* O158 apresentou maior resistência dentre três cepas avaliadas desse microrganismo, com  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 2,6$  min. A *Salmonella Senftenberg* 775W foi a bactéria mais resistente do estudo, apresentando  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 3,2$  min, enquanto para *Salmonella Oranienburg* o valor medido foi de 2,9 min. Em 70°C, a inativação das bactérias foi praticamente

instantânea. Haug (1993) indica que a destruição de *Salmonella sp.* ocorreu após 60 minutos em 55°C e em aproximadamente 20 minutos a 60°C.

Osaili *et al.* (2007) avaliando a resistência de bactérias em um produto alimentício, obteve os seguintes valores dos tempos de redução decimal ( $D_T$ ) para *Salmonella* (diversas culturas):  $D_{55^\circ\text{C}} = 69,48$  min;  $D_{60^\circ\text{C}} = 15,20$  min. A *E. coli* O157:H7 apresentou  $D_{55^\circ\text{C}} = 32,11$  min; e  $D_{60^\circ\text{C}} = 3,02$  min. Esses tempos de redução decimal são elevados se comparados com outros trabalhos, o que pode ser em função das características do produto avaliado pelos autores, o qual possuía apenas 48% de umidade.

Paterniani e Silva (2005), em estudo sobre a desinfecção de efluente terciário com energia solar, obtiveram a eliminação de 100% de *E. coli* e Coliformes totais após 4 horas de tratamento a 70°C, verificando ainda o não reaparecimento das mesmas após 24 horas do tratamento. Em teste com duração de 6 horas a 50°C a eliminação dessas bactérias também foi também de 100 %, mas não evitou o recrescimento após 24 horas. A *E. Coli* tem se mostrado uma das bactérias mais resistentes ao calor dentre aquelas frequentemente avaliadas nessas pesquisas.

Poucos estudos são encontrados com relação à destruição de vírus em lodo de esgotos por meio da temperatura. Aitken *et al.* (2005), verificaram a inativação completa de Poliovírus após 2 horas em 49°C e após 0,5 horas em 53°C. Nesse estudo, apesar dos ovos de *Ascaris* terem apresentado maior resistência térmica que o poliovírus, ambos foram inativados rapidamente em condições de temperaturas termofílicas. Mocé-Llivina *et al.* (2003), em experimento a 60°C por 30 minutos relata a redução em unidades logarítmicas ( $\log_{10}$ ) de 5,4 para o Poliovirus1; 5,1 para o CoxsackievirusB4; 4,3 para Echovirus6 e 4,4 para EV1.

### 3.3 CINÉTICA DE INATIVAÇÃO TÉRMICA DE PRIMEIRA ORDEM

Por mais de cinco décadas diversos estudos foram desenvolvidos para a proposição de modelos de inativação ou crescimento microbiano. Alguns utilizaram uma abordagem teórica ou probabilística, enquanto outros ajustaram dados experimentais com base em uma justificativa

teórica. Nenhum modelo proposto até então é amplamente aceito como sendo capaz de descrever todos os dados experimentais, cada um aborda uma situação específica (PFLUG, HOLCOMB, GÓMEZ, 2001).

De acordo com Haug (1993) e Stumbo (1973), a cinética de inativação térmica de muitos microrganismos, principalmente bactérias, pode ser modelada assumindo um decaimento de primeira ordem.

A cinética de primeira ordem, descrita pela Equação (01), expressa que a taxa de redução microbiana a uma dada temperatura é função da concentração naquele instante. Implicando que em um mesmo intervalo de tempo a redução é sempre igual.

$$\frac{dN}{dt} = -k_d N \quad (01)$$

Onde:

*N*: concentração de células viáveis;

*t*: tempo de tratamento;

*k<sub>d</sub>*: coeficiente de inativação térmica.

Essa equação é válida para sistemas que exibem curvas de sobrevivência tipo exponencial à temperatura constante. Sistemas que não exibem essa característica exigem modelagem específica. Integrando a Equação (01) nas condições limites de concentração e tempo, têm-se:

$$\int_{N_o}^{N_t} \frac{dN}{N} = - \int_{t_o}^t k_d dt \quad (02)$$

Caso seja assumido *k<sub>d</sub>* como constante, a integração da equação acima fornece a Equação (03):

$$N_t = N_o * e^{-k_d t} \quad (03)$$

Sendo,

*N<sub>o</sub>*: concentração de células em *t* = 0 (inicial);

*N<sub>t</sub>*: concentração de células no tempo *t*;

Aplicando logaritmo aos termos da Equação (03), e isolando o *t*, tem-se a Equação (04):

$$t = \frac{\left[ \ln \left( \frac{N_0}{N_t} \right) \right]}{k_d} \quad (04)$$

Considerando uma unidade logarítmica de redução na concentração de células (90% de redução), chegamos à seguinte expressão (Equação (05)):

$$D_T = \frac{2,303}{k_d} \quad (05)$$

$D_T$  é chamado de tempo de redução decimal e é o tempo necessário para atingir uma redução de 10 vezes na população de células. O valor de  $D_T$  é melhor visualizado graficamente, conforme a Figura 01. Através da curva em escala logarítmica no eixo da concentração microbiana, identifica-se claramente o valor de  $D_T$  como tempo necessário para a redução de um ciclo logarítmico na concentração microbiana. Esse valor corresponde ao inverso da inclinação da linearização da curva de inativação microbiana (AUGUSTO, 2009).

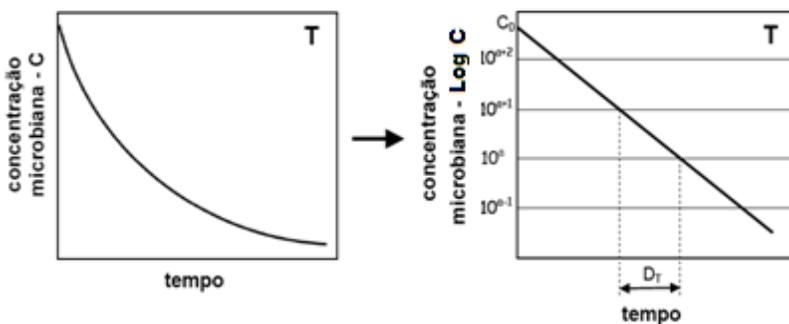


Figura 01: Determinação gráfica do valor de  $D_T$  a uma dada temperatura.

Fonte: Adaptado de Augusto (2009).

As curvas de destruição térmica refletem a resistência das bactérias a diferentes temperaturas. O termo  $z$ , denominado *coeficiente térmico*, é o inverso da inclinação da reta obtida através do gráfico de  $D_T$  em função da temperatura de exposição.

Portanto, a construção de diferentes isotermas de inativação, como a descrita na Figura 01, permite obter a relação da variação de  $D_T$

com a temperatura através do coeficiente térmico ( $z$ ), definido na Equação (06) (STUMBO, 1973).

$$\frac{\log D_2 - \log D_1}{z} = \frac{1}{z} \quad (06)$$

A interpretação de  $z$  é análoga a do  $D_T$ , pois ele representa a diferença de temperatura necessária para a redução de 1 (um) ciclo logarítmico (90%) no valor de  $D_T$ . O conceito de  $z$  pode ser melhor compreendido graficamente, conforme exposto na Figura 02.

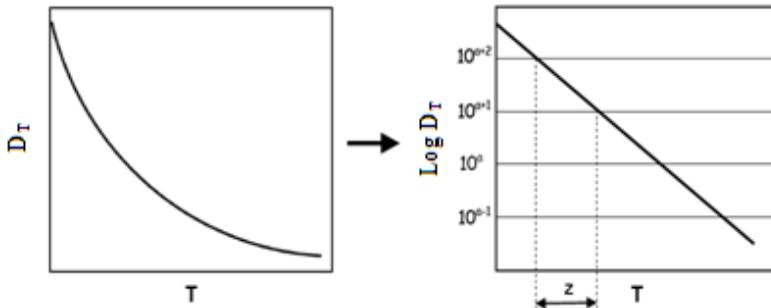


Figura 02: Determinação gráfica do valor de  $z$ .  
Fonte: Adaptado de Augusto (2009).

A inativação térmica tem sido abordada frequentemente como uma reação química, onde o modelo de Arrhenius (Equação (07)) é usado para explicar o efeito da temperatura sobre a taxa de reação (HAUG, 1993; PFLUG, HOLCOMB, GÓMEZ, 2001):

$$k_d = C * e^{\left(-\frac{E_d}{RT_K}\right)} \quad (07)$$

Onde,

$T_K$ : temperatura em Kelvin;

$C$ : constante (obtida através do gráfico com logaritmo de  $k_d$  vs  $1/T_K$ );

$E_d$ : energia de inativação;

$R$ : constante dos gases ( $R = 8,3145 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ).

As constantes  $E_d$  e  $C$  podem ser obtidas pela linearização da Equação (07), conforme segue:

$$\ln k_d = \ln C - \left(\frac{E_d}{R}\right) \left(\frac{1}{T_K}\right) \quad (08)$$

Assim, a determinação da energia de inativação e da constante  $C$  de determinado microrganismo, cujo decaimento segue um modelo de primeira ordem, pode ser útil para descrever ou prever o comportamento da curva de inativação em condições não isotérmicas, conforme a Equação (09) (HAUG, 1993).

$$\ln \left(\frac{N_t}{N_o}\right) = - \int_0^t C \cdot e^{-\left(\frac{E_d}{R \cdot T_K(t)}\right)} dt \quad (09)$$

Para resolução do modelo acima, é preciso conhecer a função da temperatura ( $T_K(t)$ ) com o tempo. Condições não isotérmicas são freqüentemente observadas em processos reais como fabricação e conservação de alimentos, sistemas de compostagem, esterilização em autoclaves, entre outros.

Para alguns microrganismos, a curva de decaimento não é exponencial e a inativação nesses casos não pode ser descrita como uma reação de primeira ordem, exigindo uma modelagem específica. *Staphylococcus aureus* e *Streptococcus fecal* podem exibir curvas de inativação que não seguem o modelo de primeira ordem (HAUG, 1993). Em culturas que contém duas ou mais espécies ou linhagens de microrganismos com diferentes resistências térmicas, o que configura uma situação de flora mista, como é o caso dos coliformes totais, também é comum a curva de sobrevivência não seguir um modelo de primeira ordem (STUMBO, 1973).

### 3.4 ENERGIA SOLAR

#### 3.4.1 A Radiação Solar

O planeta terra gira em torno do sol em uma trajetória elíptica num plano inclinado  $23,5^\circ$  aproximadamente, em relação ao plano

equatorial. Esse fator causa a variação da elevação do sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, e também origina as estações do ano, conforme expresso na Figura 03 (GARG,1982).

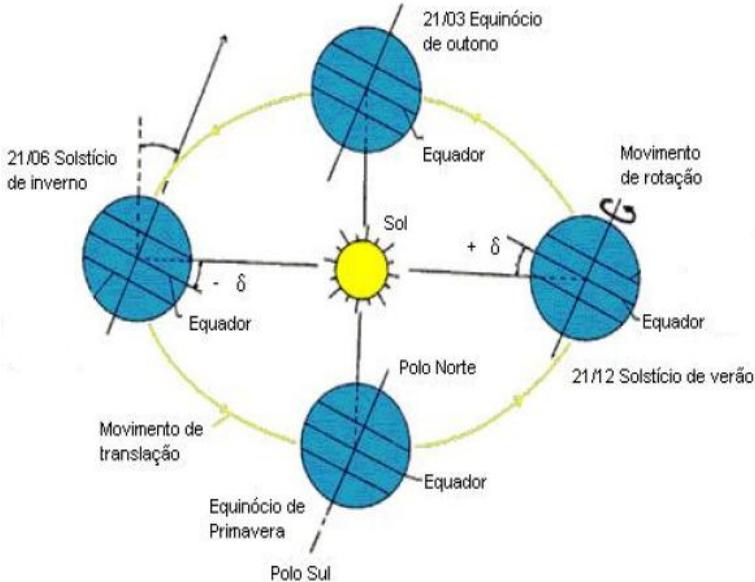


Figura 03: Inclinação do eixo da terra, movimento de translação, solstícios e equinócios.

Fonte: adaptado de Ríspoli (2008).

Denomina-se “constante solar” a intensidade da radiação solar recebida em uma superfície normal aos raios de sol no limite externo da atmosfera, quando a terra se encontra a uma distância média do sol em sua órbita. Segundo dados experimentais, um valor aceitável para essa constante é  $1.353 \text{ W/m}^2$ , com um erro estimado em  $\pm 1,5\%$ . Ao atingir a superfície da terra, a energia solar encontra-se bastante diluída devido aos gases e partículas da atmosfera, razão pela qual os sistemas de captação desta energia ocupam grandes áreas e isto constitui um item importante com relação ao seu custo (ARIAS e PETERSON, 1985).

A radiação solar incidente sobre uma superfície horizontal é denominada radiação global, possuindo uma componente *direta*, correspondendo aos fótons provenientes diretamente do feixe solar; uma componente *difusa*, sendo esta constituída pelos fótons que sofreram espalhamentos múltiplos na atmosfera e foram redirecionados para a superfície terrestre; e outra componente de menos expressividade, é a

*refletida ou albedo*, constituída pela parcela da radiação refletida ao atingir o solo, ilustradas na Figura 04 (KREITH, KREIDER, 1978; OLIVEIRA, 1997; ROSA, 2003).

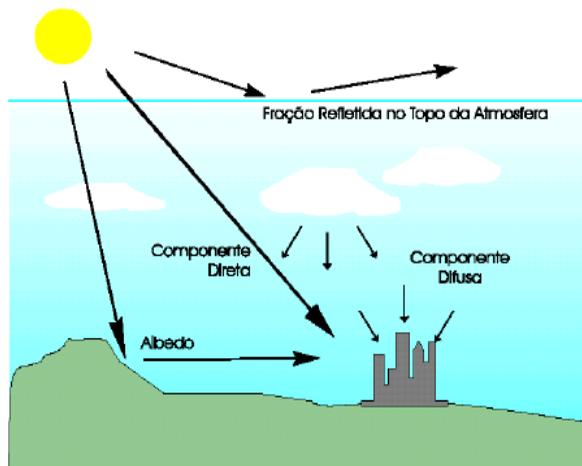


Figura 04: Componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre.  
Fonte: Oliveira (1997).

A radiação difusa representa 10 a 16% da radiação direta total que chega à superfície da terra num dia ensolarado e sem nuvens. Com o tempo parcialmente nublado, ela pode atingir 50%, e em dias completamente cobertos, corresponde à radiação global (BEZERRA, 1986).

O espectro da radiação solar se assemelha com aquele de um corpo negro à temperatura aproximada de 6000 K (TUBELIS e NASCIMENTO, 1987). A distribuição espectral aproximada da radiação solar extraterrestre pode ser visualizada na Tabela 04, conforme Garg (1982).

Tabela 04: Distribuição espectral da radiação solar extraterrestre.

Região	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Porcentagem do total (%)
Ultravioleta	0,20 – 0,40	8,7
Visível	0,40 – 0,70	38,2
infravermelho	0,70 – 3,5	51,7

Fonte: Garg (1982).

Considerando a constituição da camada atmosférica que envolve a terra, formada de vapores de água, poeiras, dióxido de carbono, etc., a curva de distribuição da radiação ao nível do mar fica bastante atenuada em virtude de seu enfraquecimento nos vários comprimentos de onda. Mesmo assim, com uma camada atmosférica de aproximadamente 145 km de espessura, a radiação solar nos fornece energia com alto potencial (BEZERRA, 1986). As absorções de radiação solar que ocorrem na atmosfera podem ser melhor visualizadas na Figura 05.

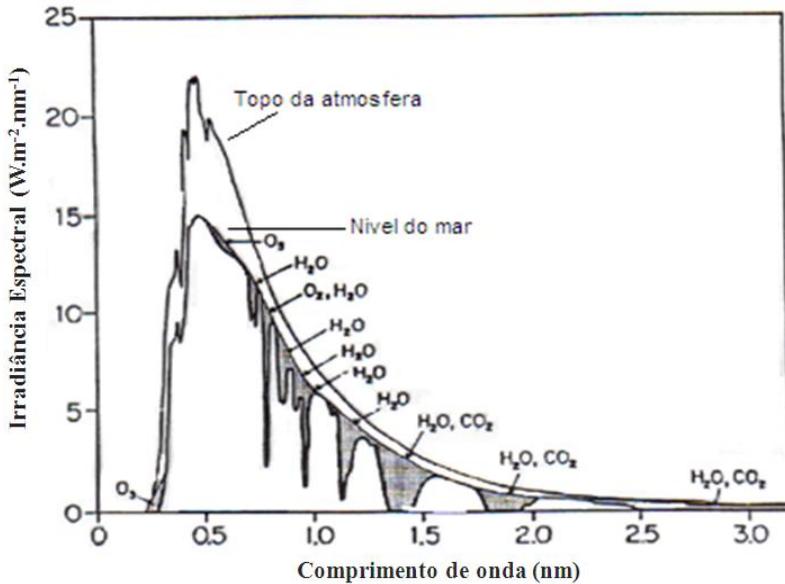


Figura 05: Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível do mar em condições atmosféricas médias, orientada para o zênite.

Fonte: Adaptado de Kreith e Kreider (1978) e Echer; Souza e Schuch (2001).

Na curva acima podemos observar a interação da radiação com os principais gases da atmosfera, causando a atenuação da curva. A absorção da radiação consiste na transformação pelas partículas da energia disponível sob forma eletromagnética em energia interna, esta poderá ser re-irradiada posteriormente, dependendo dos níveis quânticos que ela possui. Conforme observado, as moléculas de água na atmosfera exercem grande influência na transferência de energia solar, pois absorvem radiação em grande faixa do espectro solar.

De acordo com Tubelis e Nascimento (1987), a radiação solar ao atravessar a atmosfera terrestre é atenuada por três processos. O primeiro é o espalhamento pelas partículas da atmosfera. O segundo é a absorção seletiva por certos comprimentos de onda. Oxigênio, ozônio, gás carbônico e vapor d'água são os principais absorvedores. O terceiro processo é a reflexão e absorção pelas nuvens.

A constante solar anteriormente definida como taxa de radiação, não é na realidade um valor constante em virtude da terra, em seu movimento, descrever uma órbita ligeiramente elíptica, situando-se o sol em um dos focos desta elipse. Por essa razão no início de janeiro a terra está mais próxima do sol e mais afastada no início de julho. Este afastamento corresponde a 3,3% mais distante em relação à posição de primeiro de janeiro e por este fato, a radiação solar que chega à terra é cerca de 7% menor (BEZERRA, 1986).

Alterações nas emissões de radiação devem-se também a fenômenos ocorridos no Sol, como manchas solares e erupções violentas, que causam variações na intensidade da atividade solar. Esses fenômenos podem, inclusive, ter causado mudanças climáticas ocorridas no passado (FRÖLICH; LEAN, 1998).

A radiação solar consiste de ondas eletromagnéticas provenientes das reações ocorridas no sol (TUBELIS; NASCIMENTO, 1987). Convém identificar a notação e definição dos termos irradiância solar, irradiação solar e insolação, de acordo com trabalhos publicados na área (DUFFIE; BECKMAN, 1991; ARRUDA, 2004; ROSA, 2003; RÍSPOLI, 2008), conforme segue:

- *Irradiância solar* é definida a grandeza física medida, a potência ou energia resultante ou fluxo de energia que atravessa uma determinada área na superfície terrestre em um determinado instante, a unidade de mensuração frequentemente utilizada é  $W.m^{-2}$ .

- *Irradiação solar* é a grandeza física inerente à quantidade de energia radiante que atravessa uma determinada superfície num período de tempo, numericamente sendo igual à integração da irradiância solar no intervalo de tempo em questão e sua unidade de medida é  $W.h.m^{-2}$ .

- *Insolação* é o período de tempo durante o qual o feixe de radiação solar direta ilumina uma superfície. Pode ser obtida através do

registro do número de horas do dia no qual a irradiância permaneceu acima de um determinado valor, usualmente definido por  $120 \text{ W.m}^{-2}$ .

### 3.4.2 A Medição da Radiação Solar

As medidas de radiação solar são realizadas geralmente em planos horizontais, e disponibilizadas com valores médios diários ou horários. O valor da energia radiante total mensal, muitas vezes utilizado na simulação do comportamento de equipamentos solares por longos períodos de tempo, pode conduzir a erros devido a variações e a não linearidade do processo. No entanto, medições da irradiação solar global ou difusa em diversas regiões por longos períodos de tempo, são de extrema importância para construção de bases de dados e elaboração de modelos teóricos, para servir de apoio na estimativa do desempenho de equipamentos solares e no dimensionamento de sistemas de aproveitamento da energia solar.

Com o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento da energia solar, cresceu a necessidade de medições da irradiação solar. Os actinógrafos foram desenvolvidos para esse fim, possuindo como principal mecanismo um receptor bimetálico preso em uma extremidade e solto na outra, a medição é feita com base na dilatação térmica desses metais e registrada em carta de papel colocada no aparelho. Em geral as medidas são imprecisas e os erros podem chegar a 20% (TUBELIS; NASCIMENTO, 1987; ROSA, 2003).

Os instrumentos mais utilizados na medição da radiação solar são os piroheliômetros e os pironômetros, que são mais precisos que o actinógrafo, possuindo as seguintes características (OLIVEIRA, 1997; ROSA, 2003):

- *Piroheliômetros*: aceitam a radiação de apenas uma direção, mais precisamente através de um ângulo por volta de  $5,7^\circ$ . Possui um ângulo de abertura pequeno, capaz de captar a radiação proveniente do sol e da região circumsolar. É utilizado para medir a radiação direta. Possui um movimento em torno de um único eixo ajustado para corrigir a variação da declinação solar. São de grande precisão, apresentando erros da ordem de 0,2% a 0,5%.

- *Pironômetros*: também chamados de solarímetros, medem a irradiação global (direta + difusa). As medições de irradiação disponíveis são frequentemente realizadas nesse instrumento. Os

piranômetros mais utilizados são os de mecanismo fotovoltaico e o termelétrico.

- Os aparelhos *fotovoltaicos* possuem como elemento sensível uma célula solar de silício, que ao ser iluminada gera uma corrente elétrica proporcional à intensidade da radiação solar incidente. São de utilização simples e de baixo custo. São menos precisos que os termelétricos, mas úteis na realização de medidas secundárias.

- Os *termelétricos* possuem como elemento sensível uma pilha termelétrica, constituída de termopares em série, os quais geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre as suas juntas. Esses aparelhos podem ser utilizados para medir a irradiação direta ou a irradiação global em plano horizontal ou inclinado, ou ainda para obtenção da radiação difusa. O instrumento é delicado e requer cuidados na instalação e manutenção.

Os dados de insolação, frequentemente utilizados na agricultura na determinação do foto-período, são medidos em aparelhos chamados heliógrafos, que medem o número de horas diárias que a irradiância foi superior a certo valor pré-determinado (TUBELIS; NASCIMENTO, 1987). O modelo mais difundido é conhecido como heliógrafo Campbell-Stokes e dispõe de uma esfera de quartzo desempenhando a função de lente convergente para a luz solar incidente sobre ela. Por recomendações da Organização Meteorológica Mundial, se a irradiância for maior que  $120 \text{ W.m}^{-2}$ , os raios que convergem na lente atingem intensidade suficiente para queimar uma carta de papel no foco da lente, onde é feito o registro.

O equipamento deve passar por manutenção e limpeza freqüente, a fim de evitar efeitos de intempéries causadas por poeiras, ventos, geada e neve. Um problema associado a esse aparelho é a imprecisão na tomada dos dados, por conta da incerteza nas cartas de registros (RÍSPOLI, 2008).

### 3.4.3 Aproveitamento Térmico da Energia Solar – Coletores Solares

O sol fornece energia para três tipos de processos, que com base nesses podem-se distinguir outras tantas classes de meios de aproveitamento:

- a) Processos térmicos, que se subdividem em três subclasses: alta, média e baixa temperatura.

- b) Processos elétricos, que incluem os processos fotovoltaicos e geradores termoelétricos.
- c) Processos químicos e bioquímicos, como a fotólise e a fotossíntese.

Os processos térmicos com energia de baixa temperatura (até 100°C) podem ser indicados para diversas aplicações, tais como aquecimento de ambientes, aquecimento de água, condicionamento de ar, refrigeração, evaporação, destilação e geração de vapores de líquidos especiais (COMETTA, 1982). O aquecimento de água domiciliar e climatização de ambientes com energia solar já se tornou economicamente atrativo em muitas regiões (BEZERRA, 1986).

As principais aplicações dos processos de média temperatura (até 1000°C) incluem geração de vapor d'água, transformação de energia solar em elétrica e mecânica, além de fornos solares. E processos de alta temperatura (acima de 1000°C) possuem aplicações ainda mais específicas e ocorrem mediante fornos solares parabólicos (COMETTA, 1982).

Conforme já verificado (GARG, 1982; BEZERRA, 1986; TUBELIS; NASCIMENTO, 1987), a radiação solar sofre diversas influências antes de atingir a superfície terrestre, que devem ser consideradas no desenvolvimento de tecnologias de captação de energia solar:

- *Movimento de translação*: trajetória elíptica da terra em torno do sol.

- *Movimento de rotação*: causa variação constante no ângulo de incidência dos raios solares na superfície terrestre.

- *Latitude*: o aumento da latitude aumenta também a área da superfície terrestre atingida por determinado fluxo de radiação, diminuindo sua concentração.

- *Condições atmosféricas*: a quantidade de nuvens e a poluição na atmosfera terrestre interferem na passagem da radiação solar, conforme observado na Figura 05.

As flutuações ocorridas devido aos dias e noites ou à sazonalidade são, de certa forma, equacionáveis. Mas as variações na intensidade da radiação incidente na superfície terrestre, ocorridas

devido ao estado intrinsecamente aleatório da atmosfera só podem ser tratadas estatisticamente. Como não é possível fazer medições durante longo período de tempo em todas as localidades, vários modelos matemáticos têm sido desenvolvidos no intuito de, com os dados disponíveis, determinar a disponibilidade de energia radiante solar em qualquer localidade que se queira (OLIVEIRA, 1997).

Para o desenvolvimento e aplicação de sistemas com energia solar, é essencial conhecer a disponibilidade de radiação solar global para o local. No Brasil, alguns estudos concentraram esforços no mapeamento da radiação solar das diversas regiões que o compõem, destacando-se: o Atlas Solarimétrico do Brasil, publicado em 1997 pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Companhia hidroelétrica de São Francisco, em parceria com o Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB); e o Atlas de Irradiação Solar no Brasil, produzido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A Figura 06, disponível no Atlas de Irradiação Solar no Brasil (COLLE e PEREIRA, 1998), traz a exemplo de outras contidas na publicação, as regiões do Brasil com maior potencial para sistemas de aproveitamento da energia solar, através da média anual típica de irradiação solar global diária.

A captação de energia solar em forma de energia térmica é feita utilizando-se dispositivos solares denominados de coletores, que podem ser de placa plana ou de concentração. No caso dos coletores de concentração, as temperaturas atingidas podem ser bem superiores ao de placa plana. No entanto, para muitas aplicações cotidianas, os coletores planos são interessantes devido à sua simplicidade de construção, operação e baixo custo.

De acordo com Garg (1982), o coletor solar é o principal equipamento de qualquer projeto de sistema com energia solar para operação na faixa de baixa temperatura, desde a temperatura ambiente até 100°C. Sua função é transferir a energia da luz solar incidente para um fluido de trabalho, que pode ser água ou ar. Ele possui várias vantagens sobre outros tipos de coletores:

- Absorve radiação solar direta, difusa e refletida de outros componentes.
- São fixos em uma determinada inclinação de orientação, não necessitando seguir o deslocamento do sol durante o dia.
- São fáceis de fazer e possuem baixo custo de implantação.

- Possuem custo de manutenção relativamente baixo e longa vida de uso.
- Operam com eficiência relativamente alta.

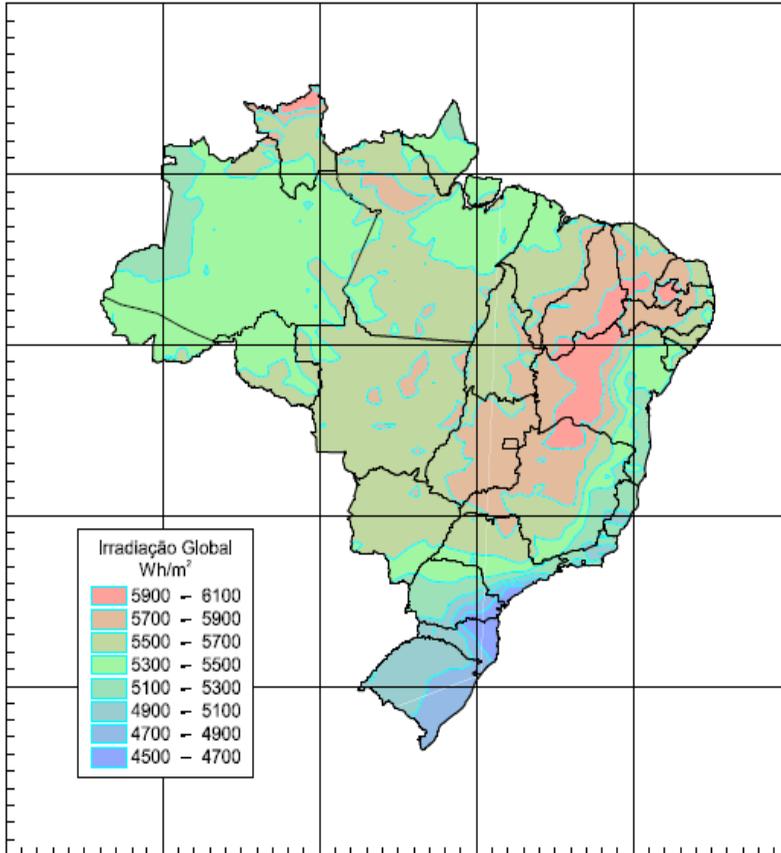


Figura 06: Irradiação solar global diária – média anual típica.

Fonte: Colle, Pereira (1998).

Um coletor solar plano para aquecimento de água é composto geralmente pelos seguintes componentes (GARG, 1982; BEZERRA, 1986; SPRENGER, 2007):

- *Moldura e chapa inferior*: formam a caixa que oferece suporte na base e laterais aos demais componentes. A preferência deve ser dada a materiais de baixa condutibilidade térmica, já que ajuda a reduzir as

perdas de calor. Apesar do alumínio ser um bom condutor, ele tem sido usado com frequência, devido a sua praticidade. Com exceção do alumínio, a caixa do coletor deve receber um acabamento interno com tinta clara brilhante ou na tonalidade do alumínio.

- *Isolante térmico*: reduz as perdas de energia térmica para o ambiente nas laterais e na parte inferior do coletor. Os materiais mais utilizados como isolante são o poliuretano expandido e lã de vidro.

- *Placa absorvedora de radiação solar*: é a peça mais importante do sistema de aquecimento solar, é formada pelo conjunto chapa-tubo, constituindo uma peça única, o que proporciona melhor transferência de energia para o fluido de trabalho, geralmente água. A fixação da chapa aos tubos pode ser feita por solda branca em toda a extensão do tubo. A chapa geralmente é construída de alumínio ou de cobre e é pintada com cor negra, para facilitar a absorção da radiação e a transferência da energia térmica.

A tubulação que contém o fluido de troca térmica geralmente é de cobre, o qual é utilizado por ser um ótimo condutor de calor facilitando a transferência da energia captada do sol para o fluido.

- *Cobertura de vidro*: impede a entrada no coletor solar de água da chuva, materiais sólidos, poeira, etc. Reduz as perdas térmicas devido aos efeitos convectivos, e principalmente, provoca o efeito estufa. Grande parte da radiação que incide no coletor penetra através do vidro e é absorvida pela chapa enegrecida e pela serpentina. Nesse processo, raios infravermelhos são refletidos ou emitidos por esses componentes e barrados pela cobertura de vidro, gerando um efeito estufa e aquecendo ainda mais o coletor solar.

Os coletores solares são construídos de diversos tipos. De acordo com Cometta (1982), a característica fundamental que devem possuir é a seletividade do revestimento, que deve ter um elevado coeficiente de absorção nos comprimentos de ondas da radiação solar. A superfície de absorção de cobre é aconselhável devido a alguns fatores:

- Condutibilidade térmica é melhor que outros materiais comuns utilizados na fabricação do coletor solar.
- Resistência à corrosão é superior a outros materiais comuns como aço e alumínio.

- O cobre não necessita de nenhuma proteção, verniz ou emprego de inibidores de corrosão, e a instalação dispensa manutenção por muitos anos.
- A alta condutibilidade térmica do cobre permite realizar coletores com chapas absorventes de espessuras mínimas com baixas inércias térmicas, o que proporciona elevado rendimento mesmo em dias nublados.

O grau de inclinação dos coletores é função da latitude do local, e a orientação para instalações no Hemisfério Sul deve ser para norte verdadeiro, de modo a captar a maior quantidade anual possível de radiação solar, conforme ilustra a Figura 07. No Hemisfério Norte, o contrário deve ocorrer. Para sistemas de circulação forçada o ângulo de inclinação deve ser igual ao da latitude do local, independente do valor (BEZERRA, 1986).

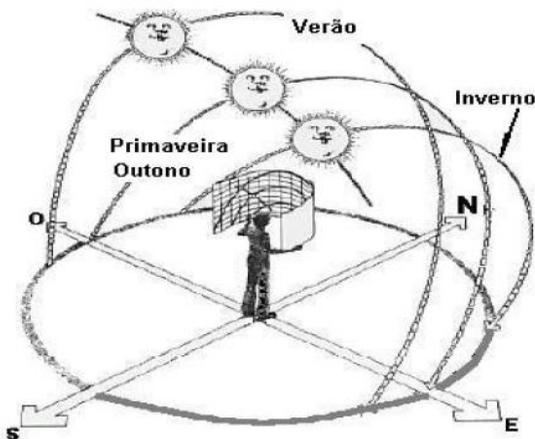


Figura 07: Movimento aparente do sol em torno da terra em uma perspectiva anual num ponto do Hemisfério Sul.

Fonte: Rísoli (2008).

A montagem dos coletores pode ser de três formas: em paralelo, em série, ou ainda em configuração mista. Na montagem em paralelo não se verifica o aumento da temperatura do fluido de um componente para outro, geralmente é utilizada em sistema de aquecimento de água termo-sifão com circulação natural.

Na montagem em série, a água circula pelos coletores e sua temperatura vai sendo gradativamente elevada, sendo que ao final sua

temperatura é maior que a atingida quando dispostos em série. Nessa configuração, utiliza-se circulação de água forçada por meio de uma bomba, já que o aumento da pressão no circuito dificulta a circulação natural.

A configuração série-paralelo é geralmente utilizada quando se pretende trabalhar com grandes vazões de água. O local da instalação deve ser estudado para evitar inconvenientes no transporte de fluido e no aproveitamento térmico.

A partir do coletor solar, a energia térmica pode ser transferida de diversas formas, e a configuração mecânica do sistema pode variar de acordo com as aplicações e os efeitos desejados. Especificamente para sistemas de aquecimento de água, geralmente a serpentina do coletor está ligada diretamente com um reservatório. A movimentação do fluido pode ser forçada, com auxílio de uma bomba hidráulica, ou simplesmente por diferença de densidade (termossifonagem). Neste caso o reservatório é disposto acima da serpentina, favorecendo o movimento do fluido por convecção natural (ARRUDA, 2004).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa envolveu duas fases que ocorreram paralelamente: uma consistiu na determinação da resistência térmica e parâmetros cinéticos de inativação da *Escherichia coli*, e a outra na avaliação do reator com aquecimento solar.

A primeira, referente à determinação de parâmetros, ocorreu no Laboratório Integrado do Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (LIMA), com auxílio do Laboratório de Transferência de Massa (LABMASSA) do Departamento de Engenharia Química.

A segunda fase, referente ao monitoramento e avaliação do reator com aquecimento solar, envolveu atividades de campo e em laboratório. As atividades de campo foram realizadas no Centro de Treinamento (CETRE) da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), no bairro Itacorubi em Florianópolis/SC, onde está instalado o reator para tratamento térmico do lodo e os coletores solares.

As análises laboratoriais dessa etapa foram desenvolvidas no Laboratório Integrado do Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (LIMA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O experimento utilizou lodo de esgoto do tanque séptico do próprio CETRE/EPAGRI, que possui capacidade de 22,6 m<sup>3</sup> (4 m de diâmetro e 1,8 m de altura). O pós-tratamento do esgoto é feito em um filtro plantado com macrófitas de fluxo horizontal. O sistema recebe efluentes da cozinha e banheiros. O tanque séptico também era destino de efluentes gerados eventualmente em oficinas de fabricação de queijos, salames e conservas, em pequena escala (SEZERINO e PHILIPPI, 1998; SUNTTI, 2010).

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

Para caracterização do lodo do tanque séptico foram coletadas 15 amostras distribuídas no período de dezembro/2009 a setembro/2010, as quais foram submetidas a análises físico-químicas. Cada análise foi realizada em duplicata. Os parâmetros avaliados nessa caracterização são apresentados no Quadro 02.

Parâmetros	Unidade	Método
Potencial Hidrogeniônico - pH	-	Potenciométrico - Standard Methods 2320 B (APHA, 1998).
Alcalinidade	(mg.L <sup>-1</sup> )	Titulométrico de líquido sobrenadante (SILVA, 1977)
Demanda Química de Oxigênio total	(mg.L <sup>-1</sup> )	Digestão em refluxo fechado - método colorimétrico - Standard Methods 5220D (APHA, 1998). Leitura em espectrofotômetro HACH®.
Ortofosfato	(mg.L <sup>-1</sup> )	Método do Ácido Vanadomolybdato
Nitrogênio Amoniacal	(mg.L <sup>-1</sup> )	Colorimétrico de Nessler (VOGEL, 1981). Leitura em espectrofotômetro HACH®.
Nitrogênio Nitrato	(mg.L <sup>-1</sup> )	Colorimétrico com brucina - Standard Methods (APHA, 1998). Leitura em espectrofotômetro HACH®.
Sólidos Totais	(mg.L <sup>-1</sup> )	Gravimétrico -secagem a 105°C (SILVA, 1977)
Sólidos Totais Voláteis	(mg.L <sup>-1</sup> )	Método gravimétrico - calcinado a 550°C (SILVA, 1977).

Quadro 02: Parâmetros físico-químicos e seus respectivos métodos de análise utilizados na caracterização do lodo de esgoto

Os parâmetros sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e potencial hidrogeniônico (pH) foram analisados em cada ensaio no reator. As amostras de lodo eram coletadas antes e depois do tratamento.

### 4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA E PARÂMETROS CINÉTICOS DE INATIVAÇÃO DA *Escherichia coli*

#### 4.3.1 Preparação do Inoculo

O inoculo foi preparado a partir do lodo de esgoto coletado no tanque séptico do CETRE/EPAGRI. Amostras de lodo de 50 ml foram centrifugadas a 1.650 xg por 15 minutos. Após a centrifugação, 40 ml do sobrenadante foram descartados e o restante guardado em recipiente estéril no máximo 6 horas, até sua utilização nos experimentos de inativação térmica. Antes do início de cada experimento, realizou-se a análise para determinação da concentração de *E. coli* no inoculo pelo método Colilert<sup>®</sup>.

#### 4.3.2 Procedimento de Inativação Térmica

Os testes de inativação térmica para determinação dos parâmetros cinéticos e resistência da *Escherichia coli* foram determinados pelo método do frasco de três bocas (método do balão) adaptado de Stumbo (1973). O frasco consiste em um balão de três bocas, as quais são utilizadas para a inserção de termopares para monitoramento da temperatura, agitador mecânico e pipetas para introdução do inoculo e retirada de amostras.

Diversos outros métodos são utilizados na literatura para determinação da resistência térmica microbiana. O mais tradicional é o método do tubo TDT de vidro (*thermal death time*) (STUMBO, 1973; CHUNG, WANG, TANG, 2007; LANG; SMITH, 2008). Outros métodos derivados também são utilizados, como por exemplo, o de tubos capilares de vidro (CHUNG, WANG, TANG, 2007), do tubo TDT de alumínio (AL-HOLY *et al.*, 2004), e do disco TDT de alumínio (JIN *et al.*, 2008). Nesses métodos, pequenos frascos com a amostra contendo o inoculo são imersos no meio de aquecimento. A transferência de calor pelo material não é imediata, resultando em um processo não isotérmico. Esse atraso térmico (lag) deve ser considerado na determinação dos parâmetros.

O método do balão é utilizado para determinar a resistência térmica de microrganismos em temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água à pressão atmosférica. O frasco de três bocas é empregado para acondicionar a amostra no aquecimento. Quando a

temperatura desejada é atingida, uma quantidade pequena de inoculo é adicionada, de modo a não causar mudanças consideráveis na temperatura. Assim o atraso térmico torna-se desprezível.

Além de evitar o atraso térmico no teste, esse método é mais simples e prático que os de frascos TDT, sendo mais apropriado na determinação dos parâmetros cinéticos de inativação de microrganismos, sejam bactérias, bolores ou leveduras, em temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água. Diversos trabalhos utilizaram essa metodologia com sucesso, a citar Augusto, Tribst, Cristianini (2009), Reveron, Barreiro, Sandoval (2005); Reveron, Barreiro, Sandoval (2003).

A inativação da *E. coli* foi realizada em duplicata nas temperaturas de 45, 50, 55, 60 e 65°C. O meio utilizado nos experimentos foi lodo de esgoto coletado no tanque séptico do CETRE/EPAGRI, previamente esterilizado em autoclave por 30 minutos em 121°C. Como a procedência desse lodo é a mesma daquele utilizado no reator com aquecimento solar, suas características físico-químicas foram determinadas conforme Quadro 02. A concentração de sólidos totais foi determinada para as amostras específicas do lodo submetido ao aquecimento (meio + inoculo) em cada experimento.

O balão contendo 900 ml da suspensão de lodo de esgoto estéril foi fixado em um banho-maria com agitação. A temperatura da suspensão foi monitorada por dois termopares. Após o sistema atingir equilíbrio térmico na temperatura definida, adicionou-se 100 ml de inoculo preparado conforme o item 4.3.1, descrito anteriormente. Amostras foram retiradas da solução em tempos predefinidos e colocadas rapidamente em banho de gelo. Após serem diluídas e receberem o substrato Colilert®, elas foram incubadas a 35°C por 24 horas

#### 4.3.3 Análise dos Dados

Com as isotermas de inativação microbiana, os valores das taxas de inativação ( $k_d$ ) foram determinados em cada temperatura através de regressão linear. Após, os tempos de redução decimal ( $D_T$ ) foram encontrados pela Equação (05). O valor de  $z$  foi determinado através do gráfico de  $D_T$  vs. temperatura. A energia de inativação ( $E_d$ ) e a constante  $C$  foram determinadas pelo gráfico de  $\ln k_d$  vs.  $1/T_K$ , conforme Equação (08).

## 4.4 PROCESSO DE DESINFECÇÃO TÉRMICA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

### 4.4.1 Configuração do Sistema

O processo de desinfecção térmica do lodo possui os seguintes componentes:

- 1) Reator para aquecimento do lodo.
- 2) Bomba hidráulica submersa para abastecimento do reator.
- 3) Coletores solares para aquecimento de água.
- 4) Trocador de calor para transferir energia térmica ao lodo.
- 5) Bomba hidráulica automática para circulação da água nos coletores solares e no trocador de calor.
- 6) Controlador para acionamento da bomba automática.
- 7) Termopares e termômetros digitais para monitoramento da temperatura.
- 8) Tanque de fibra para acondicionar o lodo após o tratamento térmico até o destino final.

A Figura 08 mostra o fluxograma do processo aplicado no tratamento.

Inicialmente o lodo do tanque séptico era enviado ao reator térmico (1) por uma bomba hidráulica submersa (2), onde ocorria o tratamento em batelada.

Os coletores solares (3) e o trocador de calor (4) estão conectados e operam em circuito fechado, tendo água como fluido de trabalho. A água circula no sistema (coletores e trocador de calor) através de uma bomba automática (5), transferindo energia térmica ao lodo. Assim, o lodo é aquecido indiretamente pela energia solar. Toda a tubulação de transporte de água entre os coletores e o trocador de calor foi isolada com poliuretano e fita isolante.

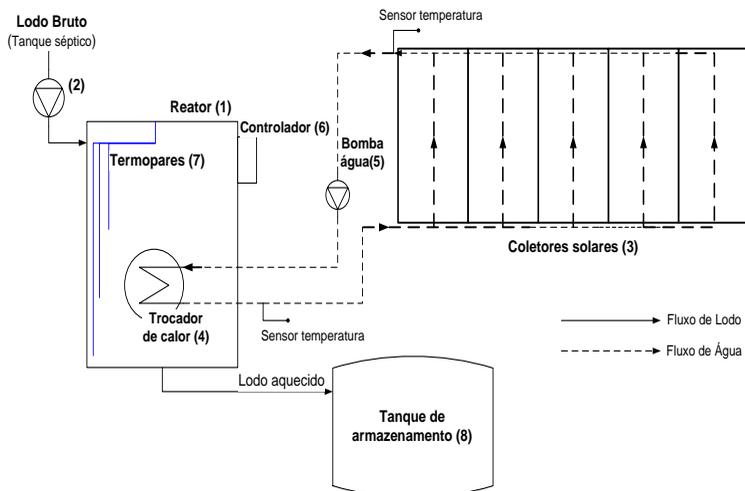


Figura 08: Fluxograma do processo de desinfecção do lodo em batelada.

Um controlador (6) aciona a bomba automática quando o diferencial de temperatura da água entre a saída dos coletores e a saída do trocador de calor for maior que  $8^{\circ}\text{C}$ . Nesse controlador também é possível visualizar a temperatura da água nos referidos pontos.

A temperatura do lodo, monitorada através de termopares instalados no interior do reator (7), é limitada pelas condições termodinâmicas do sistema. Enquanto ela for menor que a do fluido no interior dos coletores, haverá movimento desse fluido e transferência de calor. Obviamente, a temperatura do fluido nos coletores depende da incidência da radiação solar, sendo este um fator limitante do processo.

Após o lodo receber o tratamento durante o tempo pré-estabelecido, o mesmo era enviado (por gravidade) a um tanque de fibra (8), onde permanecia até atingir a temperatura ambiente e aguardando o destino final. Este trabalho não aborda o destino final do lodo por ter como foco o tratamento desinfecção utilizando energia solar. No entanto, outro projeto paralelo fazia uso desse material, que consistia no estudo do desaguamento e estabilização do lodo em filtros plantados com macrófitas.

#### 4.4.2 Componentes do Sistema

##### 1) *Reator de aquecimento*

O reator para aquecimento do lodo possui volume total de 636 litros (diâmetro interno de 0,9 m e altura de 1,0 m), e volume útil de 570 litros.

Internamente o reator foi construído com uma chapa de aço inoxidável AISI 304, que evita corrosão excessiva devido à umidade constante. Externamente possui uma chapa de ferro galvanizado pintada de preto (Figura 09). Como o reator está exposto ao sol, a pintura auxilia na absorção da radiação, elevando a temperatura da parede e reduzindo as perdas do calor interno para o ambiente. Entre as duas chapas metálicas que compõem a parede do reator, está uma camada de poliuretano expandido, servindo como isolante térmico. A espessura total da parede composta é de 0,1 m, sendo que o diâmetro externo é 1,1 m. O fundo do reator possui a mesma configuração.



Figura 09: Reator de desinfecção de lodo.

A tampa do reator foi confeccionada com uma chapa metálica, malha de fibra de vidro e placas de madeira. A chapa de ferro é a parte superior da tampa, sendo que logo abaixo se encontra as placas de madeira revestidas na parte inferior com a malha de fibra de vidro. A principal função da madeira é servir de isolante térmico, e os outros materiais apóiam na sustentação da peça. A espessura da tampa é de 10 cm. A tampa é apenas colocada sobre o reator, não sendo este hermeticamente fechado.

O reator não possui agitador interno devido a restrições de espaço, que já está ocupado com trocador de calor, e também pelo fator

econômico que representaria a adição deste componente, tanto nos custos iniciais de investimento quanto os gastos com energia na operação. Um dos objetivos da proposta de tratamento é que ele opere com os menores custos energéticos possíveis e com a mínima manutenção.

Para assumir o reator como de mistura perfeita, o lodo é agitado manualmente com um bastão antes de cada amostragem. A agitação garante que todos os pontos do reator no momento da coleta estejam com as mesmas características físico-químicas e biológicas. Além disso, o trocador de calor está disposto no fundo do reator, o que facilita a transferência de energia e massa por correntes de convecção natural, diminuindo os gradientes.

## 2) *Bomba hidráulica para transporte do lodo*

Uma bomba hidráulica submersa de  $\frac{1}{2}$  cv instalada no fundo do reator é utilizada para transportar lodo do tanque séptico até o reator de aquecimento.

## 3) *Coletores solares planos*

Os coletores são formados basicamente por uma caixa isolada termicamente contendo em seu interior um absorvedor e tubulação em cobre, pintada de preto. A Figura 10a mostra um esquema da tubulação no coletor solar, essa disposição é feita em forma de grade. O absorvedor é o principal responsável pela recepção, conversão e transferência da energia solar para o fluido de trabalho. O material geralmente utilizado na confecção dos absorvedores é uma chapa de cobre, também pintada de preto.

Na área experimental foram instalados 5 coletores solares planos (Figura 10b) com uma cobertura de vidro de 3 mm. Cada coletor possui  $1,98 \text{ m}^2$  de área total e  $1,90 \text{ m}^2$  de área útil de absorção. No hemisfério sul os coletores devem ser orientados para o norte. O grau de inclinação é função da latitude do local (BEZERRA, 1986), sendo que para Florianópolis a inclinação ótima que fornece o máximo de ganho médio anual é aproximadamente  $27^\circ$ .



Figura 10: (a) Esquema da tubulação no coletor solar; (b) coletores solares implantados na área experimental.

O número de coletores foi estimado através de um balanço básico de energia no sistema em regime estacionário.

*Energia transferida pelos coletores solares ( $Q_{\text{coletores}}$ ) > Energia necessária para aquecer o lodo ( $Q_{\text{lodo}}$ ) a uma determinada temperatura*

Sendo que a energia necessária para aquecer o lodo até uma determinada temperatura pode ser escrita pela Equação (10)

$$Q_{\text{lodo}} = M \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (10)$$

Em que:

$M$ : massa de lodo (kg)

$c_p$ : calor específico

$\Delta T$ : diferença entre temperatura final e inicial do lodo

Para simplificar o problema, assume-se que o calor específico do lodo é igual ao da água, propriedades físicas constantes e transferência de calor em regime permanente. Assim temos os seguintes parâmetros:

$$M = 200 \text{ kg}$$

$$c_p = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = (70 - 20) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Apesar de o reator possuir capacidade de 570 litros, o volume de lodo assumido para o dimensionamento foi 200 litros (200 kg

considerando densidade próxima a 1 kg/litro). O objetivo da limitação no volume de lodo é a redução dos custos com coletores solares além de facilitar o procedimento experimental.

Na diferença de temperatura assumiu-se uma elevação de 20°C até 70°C (temperatura ótima para desinfecção conforme Haug (1993) e U.S.EPA (2003)).

Substituindo na Equação (10):

$$Q_{lodo} = 200 \text{ kg} \cdot 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (70 - 20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{lodo} = 41.8 \text{ MJ}$$

Conforme dados do fabricante dos coletores solares (Empresa Solares), a potência dos mesmos com área útil de 1,90 m<sup>2</sup> pode ser assumida como 160 kWh/mês, logo:

$$Q_{coletores} = 160.000 \frac{\text{Wh}}{\text{mês}} = 576.000 \frac{\text{kJ}}{\text{mês}}$$

$$Q_{coletores} = 19,2 \text{ MJ/dia}$$

Assim, a energia aproximada disponibilizada por cada coletor de 1,9 m<sup>2</sup> é de aproximadamente 19,2 MJ/dia. Considerando perdas no sistema (reator, trocador de calor, coletores) de 50% da energia captada pelo coletor solar, temos a seguinte energia útil disponível:

$$Q_{coletores} = 19,2 \frac{\text{MJ}}{\text{dia}} \times (1 - 0,5)$$

$$Q_{coletores} = 9,6 \text{ MJ/dia}$$

Desta forma, o número de coletores necessário para atender a demanda pode ser expresso pela Equação (11), considerando o tratamento de 200 kg de lodo por dia.

$$\text{N}^\circ \text{ coletores} = \frac{Q_{lodo}}{Q_{coletores}} \quad (11)$$

$$\text{N}^\circ \text{coletores} = \frac{41,8 \text{ MJ}}{9,6 \text{ MJ}} \cong 5 \text{ coletores}$$

Vale observar que esse valor é apenas uma aproximação para norteamento do número de coletores a ser implantado, visto que o sistema funciona em estado transiente, e estará sujeito às variantes meteorológicas, aspectos construtivos, mecânicos e operacionais.

#### 4) *Trocador de calor*

O trocador de calor utilizado para transferir energia térmica ao lodo no reator foi construído com tubos de cobre. A peça é composta por 5 tubos em paralelos de 0,6 m de comprimento, 2 mm de espessura e diâmetro externo 0,06 m cada um. Eles são associados em série com um conjunto de mais 5 tubos em paralelos de mesma dimensão. O trocador está disposto a uma altura de 10 cm do fundo do reator (Figura 11).

Como a transferência de calor no lodo se dá basicamente por convecção natural, a disposição do trocador de calor no fundo do reator facilita a troca térmica e distribui melhor a temperatura, diminuindo os gradientes, principalmente em relação à altura, inerentes a esse tipo de processo.



Figura 11: Detalhes do trocador de calor.

### 5) *Bomba automática*

A bomba hidráulica automática marca Texius, modelo TBHFWE, com potência máxima de 340 W (Figura 12a), promove a circulação da água nos coletores solares e no trocador de calor. A bomba possui regulagem para três velocidades, optou-se por trabalhar sempre na velocidade II (média), cuja potência é 265 W.

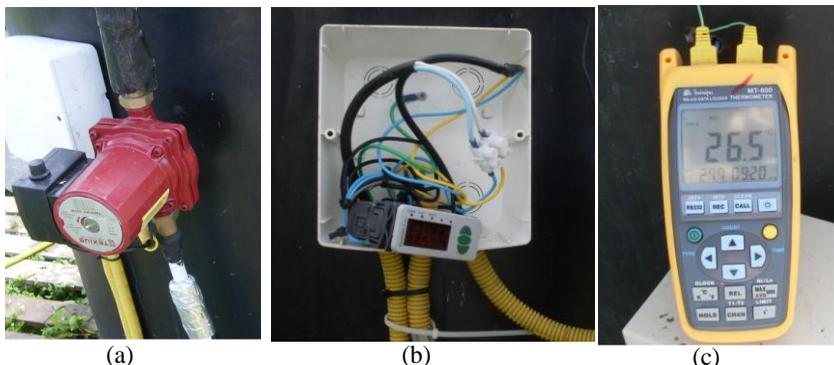


Figura 12: (a) Bomba de circulação de água nos coletores solares; (b) controlador; (c) termômetro digital.

### 6) *Controlador para acionamento da bomba automática*

A bomba de circulação de água nos coletores solares e trocador de calor é acionada automaticamente através de um controlador modelo *Microsol II plus* da marca Full Gauge Controls (Figura 12b). O parâmetro para acionamento é a diferença de temperatura da água entre a saída dos coletores ( $T_1$ ) e saída do trocador de calor ( $T_2$ ). Quando essa diferença for maior que  $8^\circ\text{C}$  a bomba é acionada, permanecendo em funcionamento até que esse diferencial se reduza a  $2,5^\circ\text{C}$ .

O controlador possui 3 canais para sensores de temperatura, incluindo *display* de visualização. Dois canais estão ocupados com  $T_1$  e  $T_2$  e o outro está conectado a um sensor dentro do reator, medindo a temperatura do lodo acima do trocador de calor ( $T_{\text{meio}}$ ), conforme exposto no próximo item (7). A bomba de circulação opera em modo automático não atrelado ao sensor 3 ( $T_{\text{meio}}$ ) e o seu acionamento ocorre somente pelo diferencial de temperatura ( $T_1 - T_2$ ).

### 7) *Sistema de monitoramento da temperatura do lodo*

A temperatura do lodo no interior do reator é monitorada por 3 termopares que estão dispostos em alturas diferentes. As correntes de convecção natural presentes no meio não são suficientes para evitar gradientes na temperatura, principalmente com relação à altura.

Em testes experimentais, observou-se que independente do volume de lodo no reator, os gradientes com relação ao raio (mapeando pontos em linhas horizontais na mesma altura), não são significativos, sendo que a máxima diferença encontrada foi de 2°C. A distribuição espacial do trocador de calor dentro do reator favoreceu a distribuição homogênea da temperatura em pontos de um mesmo plano horizontal.

Com relação à altura as diferenças são maiores, principalmente com grandes volumes de lodo que favorece a estratificação. As bordas do fundo do reator são as áreas mais difíceis de elevar a temperatura. Há formação de zonas mortas, que mesmo próximas do trocador ficam com temperaturas inferiores, podendo apresentar diferença de até 15°C com relação aos demais pontos do reator.

Entre os tubos do trocador de calor e nas suas paredes a temperatura é a mais elevada. Logo, o fundo contempla áreas com máximas e mínimas temperaturas. Felizmente os volumes de zonas mortas com temperaturas baixas são consideravelmente pequenos perante o volume total do reator com temperaturas mais elevadas, e as interferências no tratamento são mínimas.

O meio e a superfície do reator apresentam temperaturas mais elevadas, no entanto, menores que as encontradas na parede do trocador, o que é normal devido a perdas térmicas e a inexistência de instrumento mecânico de agitação, que tornaria os processos de transferência de calor mais eficientes em toda a massa líquida.

Como os maiores gradientes estão na vertical, os termopares foram instalados em diferentes alturas, conforme a Figura 13.

Um termopar monitora o fundo, na região mais afastada do trocador de calor, onde há uma zona morta e é possivelmente a temperatura mais baixa encontrada no reator ( $T_{\text{mín}}$ ).

O segundo termopar ( $T_{\text{meio}}$ ) está instalado próximo do trocador de calor, a 15 cm da base do reator, ficando a uma altura média na coluna de líquido (para um volume de 200 litros).

O terceiro termopar está alocado na superfície, cerca de 2 cm abaixo da superfície líquida ( $T_{\text{sup}}$ ). Pelas leituras realizadas a temperatura a essa altura é muito semelhante ao do  $T_{\text{meio}}$ .

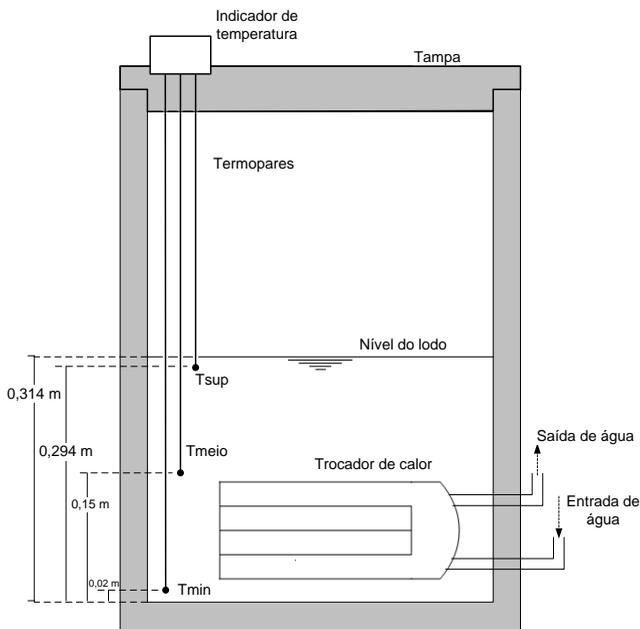


Figura 13: Localização dos termopares dentro do reator

Quanto às características dos medidores de temperaturas, nos pontos  $T_{\min}$  e  $T_{\sup}$  são usados termopares conectados a um termômetro digital (Figura 12c) com a seguinte especificação: resolução  $0,1^{\circ}\text{C}/0,1^{\circ}\text{F}$ ; armazenamento de dados em sistema *Datalogger* com capacidade de 10.000 registros.

Os termopares possuem bainha de aço inoxidável para evitar corrosão e foram calibrados de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005), conforme certificado emitido pela empresa fabricante dos equipamentos.

A temperatura  $T_{\text{meio}}$  é medida pelo sensor 3 do controlador da bomba automática, conforme descrito no item anterior.

## 8) *Tanque de armazenamento*

O tanque de fibra de vidro, com volume de 500 litros, recebe o lodo após o tratamento térmico, sua função é armazená-lo até que atinja a temperatura ambiente e receba o destino final.

#### 4.4.3 Construção e Implantação

O sistema foi construído no período de novembro/2008 a março/2009, desde então passou por vários testes e ajustes até se chegar a essa configuração. Após a implantação, vários equipamentos precisaram ser ajustados para melhorar o desempenho do processo, como a bomba de circulação de água, o controlador, trocador de calor, e a tampa do reator.

A construção do sistema foi realizada com auxílio técnico da empresa especializada *Solares Aquecimento Solar*.

#### 4.4.4 Operação

A operação padronizada do reator iniciou em dezembro/2009 e seguiu até julho/2010, abrangendo meses das quatro estações do ano.

##### A) Condições experimentais

Diversos parâmetros podem contribuir consideravelmente na eficiência do tratamento, como volume de lodo tratado, tempo de tratamento, condições meteorológicas (radiação, insolação, temperatura ambiente, etc.), área superficial do trocador de calor, isolamento térmico do reator, área útil dos coletores solares entre outros. Como seria inviável a avaliação da influência de todos esses parâmetros em um único projeto, alguns deles foram fixados a fim de melhor conduzir o estudo. Assim, foram mantidos constantes em todos os ensaios o volume de lodo, o tempo de tratamento e a configuração mecânica do sistema.

Nessas condições será possível responder um dos principais questionamentos da pesquisa: a influência das mudanças meteorológicas na temperatura do reator, principalmente no que diz respeito à radiação solar, insolação e temperatura ambiente. Pois a aplicabilidade real desse modelo de tratamento deve valer o ano todo, considerando que a produção de lodo ocorre continuamente. Também deve-se levar em conta as características locais (conforme exposto na Figura 06), visto que a sua eficiência pode mudar consideravelmente de região para região, dependendo da incidência de radiação solar.

Conforme já visto na fundamentação teórica (GARG, 1982; TUBELIS; NASCIMENTO, 1987; BEZERRA, 1986), a energia solar disponível na superfície terrestre, em um mesmo ponto, pode sofrer

variações de basicamente três formas. A primeira é inerente ao movimento de translação da terra, essa variação segue um padrão anual de acordo com a posição do local no globo terrestre. A segunda forma é referente ao movimento de rotação da terra, que faz com que o ângulo de incidência da radiação num mesmo local varie ao longo do dia. Outro fator é a condição meteorológica do local naquele momento, como a presença de nuvens e poluição.

Conforme BEZERRA (1986), em um dia nublado a radiação difusa pode representar até 100% da radiação global, dependendo da intensidade dos fenômenos de absorção e reflexão da radiação pelas moléculas de água da atmosfera. Desta forma, os ensaios foram realizados de forma a contemplar diferentes períodos do ano e diferentes condições meteorológicas.

Com relação às variantes meteorológicas, os ensaios foram realizados em duas condições: céu aberto e céu encoberto.

Os ensaios realizados em dias com céu aberto (predomínio de sol) ocorreram no período de dezembro/2009 a julho/2010, com a finalidade de verificar a aplicabilidade do reator em diferentes épocas do ano.

Os ensaios em condições de céu encoberto foram realizados no período de dezembro/2009 a abril/2010, com a finalidade de verificar o comportamento do reator nessas condições na época do ano com maior incidência da radiação solar.

## B) Número de ensaios e tempo de tratamento

A avaliação de desinfecção do lodo no reator com aquecimento solar foi realizada com tratamentos em batelada. Conforme diversas pesquisas que avaliaram a destruição de patógenos em lodo de esgoto (AITKEN *et al.*, 2005; PERCSON *et al.*, 2007; LANG; SMITH, 2008; PATERNIANI; SILVA, 2005; HAUG; 1993), 60 min de tratamento em 60°C seria suficiente para inativar ovos de *Ascaris lumbricoides*. Para *Escherichia coli*, que é uma das bactérias que apresenta considerável resistência ao calor, foi identificado a sua destruição após 55 min em 55°C; e em menos de 10 min a 70°C.

Nessa pesquisa a temperatura do reator não é constante, pois depende de variáveis externas. Por isso, para estimar o tempo ótimo de tratamento, ou seja, o tempo necessário para inativação completa dos microrganismos torna-se necessário conhecer o perfil de temperatura desenvolvido no lodo ao longo do tempo nas diferentes condições meteorológicas ou épocas do ano.

Para avaliar esses efeitos foram realizados 20 ensaios no período de dezembro/2009 a julho/2010, conforme observado no Quadro 03.

<b>Ensaio</b>	<b>Data</b>	<b>Condição meteorológica</b>
01	03/12/2009	Céu aberto
02	07/12/2009	Céu aberto
03	20/12/2009	Céu aberto
04	16/01/2010	Céu encoberto
05	23/01/2010	Céu encoberto
06	30/01/2010	Céu aberto
07	06/02/2010	Céu aberto
08	20/02/2010	Céu aberto
09	13/03/2010	Céu aberto
10	27/03/2010	Céu encoberto
11	11/04/2010	Céu encoberto
12	17/04/2010	Céu aberto
13	01/05/2010	Céu aberto
14	09/05/2010	Céu aberto
15	05/06/2010	Céu aberto
16	12/06/2010	Céu aberto
17	27/06/2010	Céu aberto
18	03/07/2010	Céu aberto
19	25/07/2010	Céu aberto
20	31/07/2010	Céu aberto

Quadro 03: Data e condição meteorológica em cada ensaio.

Para verificar o perfil de temperatura no reator ao longo do ano, o tempo de duração de cada ensaio foi fixado em 8 horas, sempre com início e término no mesmo horário do dia (*início 9h00min; término às 17h00min*). De acordo com dados meteorológicos fornecidos pela INMET, esse intervalo de tempo compreende o período do dia com maiores índices de radiação solar, em todas as estações do ano (ver Figura 14). Dessa forma é possível verificar o potencial máximo do reator e também acompanhar o perfil de temperatura desenvolvido ao longo do tratamento e a cinética de inativação.

A permanência do lodo no reator após às 17h00min não acarretaria um aumento considerável da inativação, visto que após esse horário a temperatura do lodo tende a decrescer devido à diminuição da radiação solar. O objetivo desse trabalho é apenas avaliar o processo físico de desinfecção térmica considerando uma batelada por dia no período de maior incidência da radiação solar, das 09h00min às 17h00min.

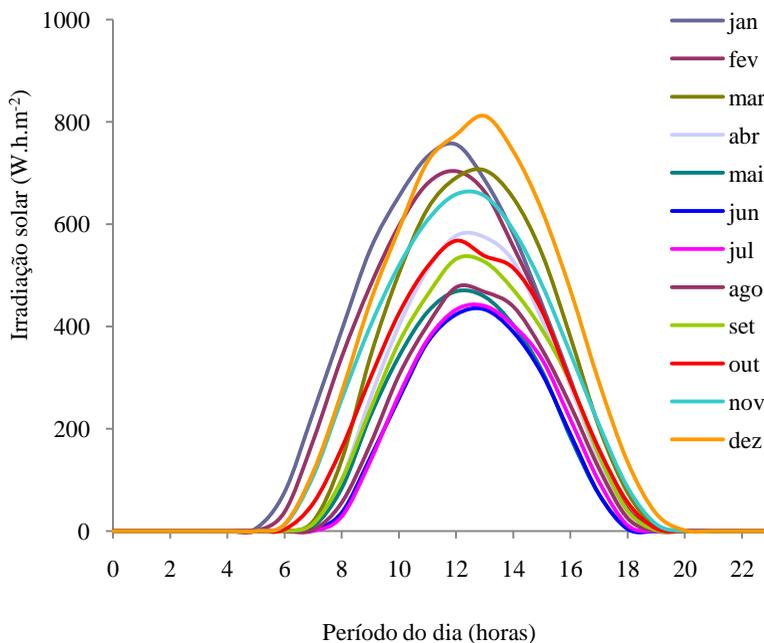


Figura 14: Dados médios de irradiação solar coletados no ano de 2007, 2008 e 2009 na estação meteorológica do INMET em São José na Grande Florianópolis/SC<sup>2</sup>.

### C) Volume de lodo

O número de coletores solares foi estimado para aquecimento de 200 litros de lodo até 70°C. Esse volume foi fixado em todos os 20 ensaios realizados.

#### 4.4.5 Parâmetros de Análises e Monitoramento

<sup>2</sup> O gráfico foi produzido com dados de irradiação solar coletados na estação meteorológica automática do INMET, em São José, na Grande Florianópolis (Latitude: -27,6000°; Longitude: -48°6166; Altitude 1,80 m), e disponibilizados por intermédio do CIRAM/EPAGRI. As curvas foram traçadas com valores médios dos dados diários, durante o ano de 2007, 2008 e 2009.

#### A) Parâmetros microbiológicos

Para avaliação da eficiência do processo de tratamento térmico, o lodo foi submetido a análises microbiológicas durante o tratamento. Os parâmetros avaliados foram *Escherichia coli* e coliformes totais, pelo método Colilert®.

Amostras para análises de Coliformes Totais e *Escherichia coli* foram coletadas ao longo das 8 horas de tratamento, a fim de verificar a curva de decaimento microbiano com o tempo.

Foram realizadas análises de helmintos em quatro amostras de lodo bruto, no entanto, não foram detectados ovos viáveis, devendo-se provavelmente às características microbiológicas do efluente gerado no local, que não possui ou possui baixas concentrações desses agentes. Tal fato impossibilitou o acompanhamento desse parâmetro nos ensaios de inativação térmica no reator.

#### B) Parâmetros físico-químicos

Paralelamente às análises microbiológicas, alguns parâmetros físico-químicos foram monitorados em cada ensaio, sendo eles sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e pH, conforme os métodos descritos no Quadro 02.

Como a temperatura atingida ao longo do experimento é branda (dificilmente atinge 75°C na configuração deste processo), o aquecimento não provocará alterações físico-químicas significativas no lodo, tornando dispensável a análise de outros parâmetros.

O monitoramento da temperatura do lodo ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{meio}}$ ,  $T_{\text{sup}}$ ) foi feito através de termopares conforme item 6 e 7 do subtítulo 4.4.2.

#### 4.4.6 Recrescimento Microbiano

Conforme Haug (1993); Pflug, Holcomb e Gómes (2001) e Paterniani e Silva (2005), após algumas horas do tratamento de desinfecção pode haver a reativação microbiana, dependendo da intensidade do mesmo. Para monitoramento dessa possível condição, uma amostra de lodo tratado foi coletada e acondicionada em frasco esterilizado por 24 horas em condições ambiente, sendo em seguida submetida a análises de coliformes totais e *Escherichia coli*.

#### 4.4.7 Procedimento Experimental dos Ensaio no Reator

Em todos os ensaios o procedimento experimental foi o mesmo. Após a alimentação do reator com lodo, a solução era homogeneizada com um bastão e realizava-se uma amostragem para as análises microbiológicas e físico-químicas. O volume de lodo alimentado no reator era medido com uma régua calibrada. A alimentação foi realizada com auxílio da bomba hidráulica submersa, instalada dentro do tanque séptico.

Após a coleta de amostras e ajustes dos termopares, o reator era fechado e iniciava-se o monitoramento da temperatura. A tomada das temperaturas do lodo pelos termopares foi realizada em intervalos de aproximadamente 10 minutos. Paralelamente, a temperatura do ar foi monitorada através de um termômetro de mercúrio.

Para verificar a inativação microbiana com o aquecimento, 6 (seis) amostras de lodo foram coletadas ao longo do experimento. Após cada coleta a amostra era guardada em bolsa térmica com gelo até o momento das análises, que eram realizadas logo em seguida ao ensaio no reator.

Na primeira amostragem eram coletados dois frascos, um para análises microbiológicas e outro para análises físico-químicas. Na última amostragem (8 horas de tratamento) eram coletados dois frascos para análises microbiológicas e um para análises físico-químicas. Neste caso, uma amostra era reservada para avaliar o recrescimento microbiano após 24 horas de tratamento. Essa amostra foi conservada em local arejado à temperatura ambiente e em frasco esterilizado.

Depois de completado 8 horas de tratamento, a válvula de saída do reator era aberta e o lodo encaminhado para o tanque de armazenamento, onde ficava aguardando destino final e o reator era então lavado. Periodicamente, a cobertura de vidro dos coletores solares também era lavada com água, para evitar o acúmulo de partículas de poeira. A água de circulação nos coletores solares era repostada antes de cada ensaio.

#### 4.4.8 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos de radiação solar e insolação foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), os quais foram coletados na estação automática de Florianópolis/São José, localizada em São José/SC (Latitude: -27,6000°; Longitude: -48.6166°;

Altitude: 1.80 metros), que é a estação mais próxima da área experimental. O instrumento utilizado para medir a radiação global foi um Piranômetro, conforme estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial. A insolação foi medida através de um Heliógrafo.

Apesar da leitura pontual de irradiação solar diferir de um local para outro, os valores médios para o período do tratamento na região da grande Florianópolis são aproximados considerando que o local do experimento é próximo da estação meteorológica.

Para realização dos ensaios no reator definiu-se como *céu aberto* o estado próximo ou igual ao de céu limpo, quando o predomínio em todo o período do ensaio foi de sol. Para *céu encoberto* definiu-se como o estado de céu nublado, total ou parcialmente, onde do ponto de observação o céu esteve encoberto por nuvens durante todo o período do ensaio.

#### 4.4.9 Predição da Inativação Térmica da *Escherichia coli* no Reator com Aquecimento Solar

A temperatura do lodo no reator com aquecimento solar é dependente da radiação disponível. Em todos os ensaios realizados, o período do dia de maior incidência da radiação solar foi contemplado, sendo que o lodo ficou em aquecimento desde as 09h00min até as 17h00min. Nesse intervalo, a temperatura do lodo descreveu uma trajetória que pode ser ajustada com um modelo em função do tempo (t). Assim, temos que  $T_K = T_K(t)$  e conseqüentemente, a inativação microbiana ocorre em regime não isotérmico.

Da Equação (07), temos que a taxa de inativação térmica ( $k_d$ ) é dependente da temperatura. Sendo assim, a inativação microbiana pode ser escrita em função do tempo na forma diferencial, conforme propõe Haug (1993) (Equação (12)).

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot C \cdot e^{-\left(\frac{E_d}{R \cdot T_k(t)}\right)} \quad (12)$$

Onde os parâmetros  $C$  e  $E_d$  foram determinados experimentalmente conforme descrito no item 4.3,  $T_K(t)$  é o modelo empírico da temperatura para cada ensaio e  $N$  é a concentração de *E. coli*. O termo  $R$  é a constante dos gases ideais ( $R = 8,3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

A Equação (12) foi resolvida numericamente através do programa computacional *Wolfram Mathematica 7.0*<sup>®</sup>, nas seguintes condições iniciais e finais:

*Iniciais:*

$$t = t_o = 0 \text{ minutos (09h00min)}$$

$$N = N_o$$

*Final:*

$$t = t_f = 480 \text{ minutos (17h00min)}$$

Os dados do modelo de inativação obtidos a partir da Equação (12) foram plotados graficamente com os dados experimentais de cada ensaio. Como parâmetros de avaliação foram utilizados o coeficiente angular da reta, o coeficiente de determinação e a porcentagem de variância (%V), determinada pela Equação (13) e adaptada de Cerf, Davey, Sadoudi (1996).

$$\%V = \left( 1 - \frac{(1 - R^2)(p - 1)}{(p - P - 1)} \right) \times 100 \quad (13)$$

Onde

$R^2$ : coeficiente de determinação;

$p$ : número de observações;

$P$ : número de variáveis no modelo ( $P = 1$ ).

A porcentagem de variância é a medida da diferença entre os valores observados e preditos, e é considerado adequado para casos onde há poucos dados, ou grande número de termos no modelo.

#### 4.4.10 Análise dos Resultados

A verificação da eficiência do sistema na desinfecção do lodo de esgoto foi realizada confrontando-se os dados de inativação microbiana (destruição de *E. coli* e coliformes totais) com os índices de radiação solar no período dos ensaios e a curva de temperatura atingida pelo lodo. O potencial do tratamento também foi verificado com relação ao recrescimento desses microrganismos após 24 horas do ensaio.

A influência de fenômenos meteorológicos no processo foi investigada comparando-se dados de irradiação solar, insolação e temperatura ambiente com os efeitos repercutidos na temperatura do lodo, e por fim, na desinfecção do lodo, contemplando condições de céu

aberto e encoberto. E para avaliação do funcionamento do reator em diferentes épocas do ano, ensaios realizados em dias ensolarados nas quatro estações do ano foram comparados.

Os dados de inativação microbiana obtidos no reator com aquecimento solar foram submetidos à análise de variância com auxílio do programa *Statistics 7.0*<sup>®</sup>, para verificar se há diferenças significativas no tratamento com relação à época do ano e a condição meteorológica, considerando as mudanças na incidência de radiação solar na localidade em questão.

Os dados de temperatura do lodo de cada ensaio foram tratados no programa *Microcal Origin 6.0*<sup>®</sup>, onde através de regressão não-linear foram ajustados modelos de predição em função do tempo de tratamento.

Os parâmetros obtidos para descrever a temperatura do lodo em função do tempo foram utilizados no modelo de predição da inativação da *E. coli* no reator (Equação (12)), juntamente com os parâmetros cinéticos obtidos no item 4.3, considerando um decaimento de primeira ordem em condições não isotérmicas (conforme item 4.4.9).

Os valores obtidos na predição da destruição de *E. coli* em cada ensaio foram comparados graficamente com os dados observados experimentalmente. Os parâmetros de avaliação utilizados foram o coeficiente angular da reta, coeficiente de determinação e a porcentagem de variância.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO LODO DE ESGOTO

As características dos efluentes domésticos podem sofrer variações de acordo com a procedência, assim como lodo de esgoto gerado nos diversos sistemas de tratamento também são característicos de cada processo. A Tabela 01 apresentou alguns parâmetros obtidos na literatura para lodos gerados em tanques sépticos. E na Tabela 05 consta a caracterização físico-química do lodo em estudo.

A caracterização foi obtida através de 15 amostragens realizadas entre dezembro/2009 e setembro/2010, exceto para sólidos e pH, cujas análises eram realizadas em cada ensaio no reator térmico.

Tabela 05: Caracterização físico-química do lodo de esgoto do tanque séptico.

Parâmetro	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
pH	7,12	7,62	6,68	0,22
Alcalinidade (mg.L <sup>-1</sup> )	236	511	24	177
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	14.253	26.175	2.300	8.014
Amonia (mg.L <sup>-1</sup> )	70,6	120,5	21,4	30,6
Nitrato (mg.L <sup>-1</sup> )	1,4	5,3	0,5	1,2
Ortofosfato (mg.L <sup>-1</sup> )	40,5	67,3	6,8	15,7
Sólidos Totais (mg.L <sup>-1</sup> )	4.465	9.819	2.067	1.961
Sólidos Totais Voláteis (mg.L <sup>-1</sup> )	2.035	4.930	879	1.013
Teor de sólidos voláteis (%)	45,2	51,1	38,9	4,2

Para análise dos sólidos e pH, as amostras foram coletadas antes e depois do tratamento no reator térmico, a fim de verificar se houve alguma variação aparente nas características do lodo com o aquecimento. No Apêndice A é apresentado os resultados dessas análises para cada ensaio. Conforme o desvio padrão da média com relação aos sólidos totais voláteis (STV) e pH, observa-se que não houve alterações aparentes nas características do lodo com o

aquecimento. As leituras das amostras antes e depois do aquecimento foram semelhantes em todos os ensaios.

Na Tabela 05 observa-se a elevada variabilidade nas concentrações dos parâmetros, sendo aceitável em sistemas reais, sujeitos a variações na carga dos efluentes.

Os valores de sólidos foram relativamente baixos se comparados com a Tabela 01, o que é devido à forma de sucção do lodo, onde o mesmo passa do tanque séptico diretamente ao reator térmico por bombeamento hidráulico. Apesar de a bomba estar disposta no fundo do tanque séptico, devido a sua dimensão e vazão, uma grande fração de líquido acaba sendo transportada com os sólidos, diminuindo a sua concentração.

Os parâmetros microbiológicos avaliados neste trabalho foram *Escherichia coli* e coliformes totais. A concentração de *E. coli* e coliformes totais no lodo bruto, medidas antes de cada ensaio no reator térmico, variaram na ordem de  $10^3$  a  $10^5$  NMP/ml, que está dentro da faixa observada na literatura (INGUNZA *et al.*,2009; WHO, 2006). O Apêndice C contém o logarítmico das concentrações de *E. coli* e coliformes totais antes e após o tratamento térmico.

Tentou-se avaliar também ovos de helmintos, no entanto, em quatro análises de caracterização do lodo bruto, esses agentes não foram detectados, dificultando a avaliação sistematizada do reator com relação a esse parâmetro. Conforme Ingunza *et al.*(2009), a variabilidade de helmintos em efluentes domésticos é maior se comparada com outros organismos. A sua concentração é mais dependente das características sanitárias da população, podendo estar ausente em algumas amostras e presente em outras.

## 5.2 RESISTÊNCIA TÉRMICA E PARÂMETROS CINÉTICOS DE INATIVAÇÃO DA *Escherichia coli* EM LODO DE ESGOTO

A Figura 15 apresenta as curvas de inativação térmica em lodo de esgoto da *Escherichia coli* obtidas nas temperaturas de 45°C, 50°C, 55°C, 60°C e 65°C. Para cada temperatura, o experimento foi realizado em duas repetições, os quais estão simbolizados por diferentes marcadores no gráfico. O decaimento na concentração microbiana pode ser descrito por uma cinética de primeira ordem, sendo que o coeficiente

de determinação das regressões lineares ficou acima de 0,93 (Tabela 06).

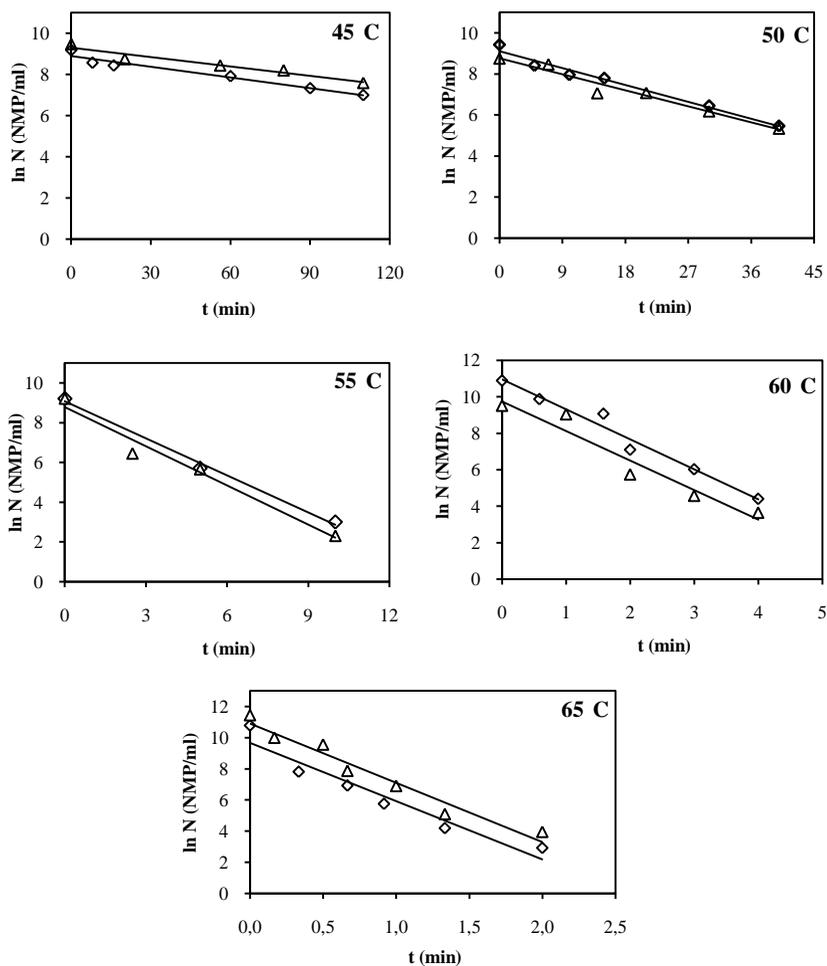


Figura 15: Curvas de inativação térmica da *Escherichia coli* em lodo de esgoto a 45°C, 50°C, 55°C, 60°C e 65°C, realizadas em duplicada ( $\diamond$  repetição 1;  $\Delta$  repetição 2).

As características físico-químicas do lodo utilizado nos experimentos podem ser observadas na Tabela 05. A concentração média ( $\pm$  desvio padrão) de sólidos totais (ST) específica para o lodo

utilizado como meio de aquecimento acrescido do inoculo foi de 3.980 ( $\pm$  1.560) mg.L<sup>-1</sup>. A concentração de sólidos totais voláteis determinada foi de 2.449 ( $\pm$  815) mg.L<sup>-1</sup>.

A utilização do modelo cinético de primeira ordem para determinação do valor de D<sub>T</sub> de diferentes cepas de *E. coli* em condições de temperatura constante, também pode ser verificado em Chung, Wang e Tang (2007); Jin *et al.* (2008); Lang e Smith (2008); Oteiza, Giannuzzi e Califano (2003); Gabriel, Cruz e Guzman (2008); e Juneja e Marmer (1999).

Convém observar que é comum em culturas com diversas linhagens de bactérias, a curva de sobrevivência não seguir uma reação de primeira ordem. No entanto, isso não foi verificado nesse estudo, os gráficos da Figura 15 demonstram que a inativação pode ser descrita de modo satisfatório através desse modelo cinético. Também em culturas que contém duas ou mais espécies de microrganismos com diferentes resistências térmicas podem ocorrer tal situação, o que configura uma situação de flora mista, como é o caso dos coliformes totais (STUMBO, 1973).

A Tabela 06 apresenta a taxa de inativação térmica de cada repetição obtida através das regressões lineares da Figura 15, além do seu valor médio com o respectivo desvio padrão para cada temperatura.

Tabela 06: Taxa de inativação térmica da *Escherichia coli* ( $k_d$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e desvio padrão para cada temperatura.

T (°C)	Repetição	$k_d$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	$k_d$ (médio)	Desvio Padrão																																	
45	1	0,0172	0,95	0,0162 min <sup>-1</sup>	0,0014																																	
	2	0,0152	0,94			50	1	0,0912	0,98	0,0889 min <sup>-1</sup>	0,0033	2	0,0865	0,96	55	1	0,6215	0,99	0,6390 min <sup>-1</sup>	0,0247	2	0,6564	0,97	60	1	1,6416	0,97	1,6310 min <sup>-1</sup>	0,0151	2	1,6203	0,94	65	1	3,7461	0,93	3,7761 min <sup>-1</sup>	0,0424
50	1	0,0912	0,98	0,0889 min <sup>-1</sup>	0,0033																																	
	2	0,0865	0,96			55	1	0,6215	0,99	0,6390 min <sup>-1</sup>	0,0247	2	0,6564	0,97	60	1	1,6416	0,97	1,6310 min <sup>-1</sup>	0,0151	2	1,6203	0,94	65	1	3,7461	0,93	3,7761 min <sup>-1</sup>	0,0424	2	3,8060	0,96						
55	1	0,6215	0,99	0,6390 min <sup>-1</sup>	0,0247																																	
	2	0,6564	0,97			60	1	1,6416	0,97	1,6310 min <sup>-1</sup>	0,0151	2	1,6203	0,94	65	1	3,7461	0,93	3,7761 min <sup>-1</sup>	0,0424	2	3,8060	0,96															
60	1	1,6416	0,97	1,6310 min <sup>-1</sup>	0,0151																																	
	2	1,6203	0,94			65	1	3,7461	0,93	3,7761 min <sup>-1</sup>	0,0424	2	3,8060	0,96																								
65	1	3,7461	0,93	3,7761 min <sup>-1</sup>	0,0424																																	
	2	3,8060	0,96																																			

A dependência da taxa de inativação com a temperatura pode ser descrita pelo modelo de Arrhenius (Equação (07)), conforme Haug (1993). A energia de inativação  $E_d$  e a constante  $C$  foram obtidas através da linearização dessa equação, cuja reta está representada na Figura 16. O valor encontrado para energia de inativação foi de  $2,48 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$ , utilizando  $R = 8,3145 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$  e para a constante  $C$  foi  $1,03 \times 10^{39} \text{ min}^{-1}$ .

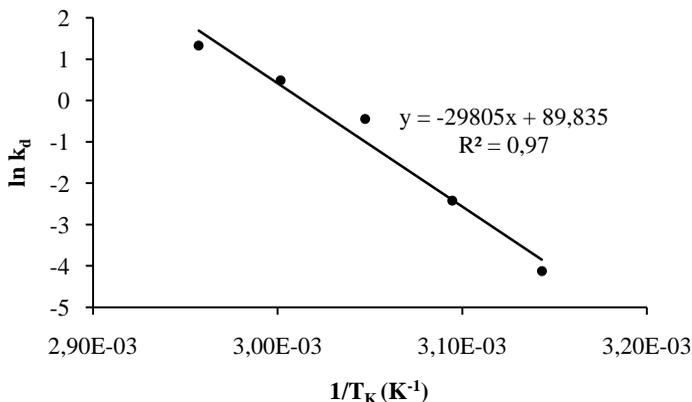


Figura 16: Obtenção das constantes de inativação  $E_d$  e  $C$  para *E. coli* em lodo de esgoto.

Yaghmaee e Durance (2005) determinaram a energia de inativação térmica da *E. coli* (ATCC 11775) em suspensão aquosa, cujo valor foi  $2,32 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$ , o que se aproxima muito do valor encontrado neste trabalho. Sawai *et al.* (2003) também determinaram a energia de inativação da *E. coli* (745) em suspensão aquosa, com valor de  $4,05 \times 10^5 \text{ J.mol}^{-1}$ .

Na Tabela 07 são apresentados os valores do tempo de redução decimal  $D_T$  para cada repetição e o valor médio para cada temperatura e seu respectivo desvio padrão.  $D_T$  representa o tempo para redução de uma unidade logarítmica ou 90% na concentração do microrganismo em estudo, em determinada temperatura. Observa-se que a baixa taxa de inativação a  $45^\circ\text{C}$  ocasiona um alto valor de  $D_T$ , foram estimados mais de 142 minutos a essa temperatura para redução de um ciclo logarítmico, o que tornaria um processo de inativação térmica pouco seguro.

A  $50^\circ\text{C}$  o tempo de redução decimal diminui para 25,93 minutos, mesmo assim continua um valor alto, representando um tratamento de

baixa intensidade. Já em 55°C ou mais, os valores de  $D_T$  são bastante reduzidos (menores que 3,61 minutos), o que implica numa condição mais apropriada para condução de tratamento térmico de higienização ou redução de patógenos em lodo de esgoto.

Tabela 07: Valores de  $D_T$  para cada temperatura e seu respectivo desvio padrão.

T (°C)	Repetição	$D_T$ (min)	$D_T$ médio	Desvio Padrão
45	1	133,87	$D_{45^\circ\text{C}} = 142,68$ min	12,46
	2	151,49		
50	1	25,25	$D_{50^\circ\text{C}} = 25,93$ min	0,97
	2	26,62		
55	1	3,70	$D_{55^\circ\text{C}} = 3,61$ min	0,14
	2	3,51		
60	1	1,40	$D_{60^\circ\text{C}} = 1,41$ min	0,01
	2	1,42		
65	1	0,61	$D_{65^\circ\text{C}} = 0,61$ min	0,01
	2	0,60		

Poucos são os trabalhos que trazem valores do tempo de redução decimal para *E. coli* em esgoto ou lodo de esgoto, a maioria dos estudos de inativação térmica são realizados em alimentos. De certa forma, os processos de desinfecção de lodo de esgoto, entre eles o tratamento térmico, ainda tendem a ser mais explorados e otimizados na medida em que cresce o interesse na utilização agrícola desse material, e também na medida em que os países vão adequando sua legislação de modo a tornar essa prática mais segura.

A Tabela 08 apresenta a comparação de alguns valores de  $D_T$  para *E. coli* obtidos em diferentes trabalhos. Observa-se que eles podem variar conforme a cepa do microrganismo e o meio em que ela está inserida. Os valores de  $D_T$  encontrados nesse trabalho não correspondem a nenhuma cepa específica, pois elas não foram pré-selecionadas no inóculo e o método de quantificação utilizado detecta todas as células de *E. coli* presentes. No entanto, os tempos de redução mostram-se dentro do esperado, não se distanciando dos observados na Tabela 08.

Os valores de  $D_{55^\circ\text{C}}$  para a *E. coli* encontrados na literatura variaram de 0,96 a 7,1 minutos, e o valor determinado nesse trabalho, utilizando como meio o lodo de esgoto, foi de 3,61 minutos. Não foram

encontrados trabalhos que fizessem referência à valores de  $D_T$  em temperaturas inferiores a  $54^\circ\text{C}$ , o que pode ser devido às baixas taxas de inativação desse microrganismo nessas temperaturas.

Tabela 08: Tempos de redução decimal ( $D_T$ ) para *E. coli* em diferentes trabalhos.

Cepa	Meio	$D_T$ (min)	Referência
NCTC 9001	Sobrenadante de	$D_{55^\circ\text{C}} = 2,1$	Lang e Smith (2008)
O148	lodo líquido	$D_{55^\circ\text{C}} = 2,4$	
O158	centrifugado	$D_{55^\circ\text{C}} = 2,6$	
NCTC 9001	Caldo Triptona de Soja	$D_{55^\circ\text{C}} = 4,4$	
O148		$D_{55^\circ\text{C}} = 7,1$	
O158		$D_{55^\circ\text{C}} = 5,9$	
K-12	Batata + água (15,38% p/p)	$D_{57^\circ\text{C}} = 0,96$ $D_{60^\circ\text{C}} = 0,32$	Chung, Wang, Tang (2007)
O157:H7	Suco de maçã	$D_{55^\circ\text{C}} = 4,43$	Gabriel e Nakano (2009)
K-12		$D_{55^\circ\text{C}} = 0,96$	
O157:H7	Solução tampão de fosfato	$D_{55^\circ\text{C}} = 2,55$	
K-12		$D_{55^\circ\text{C}} = 1,18$	
O3:H6	Água deionizada	$D_{55^\circ\text{C}} = 6,68$	Spinks <i>et al.</i> (2006)
		$D_{60^\circ\text{C}} = 0,85$	
		$D_{65^\circ\text{C}} < 0,03$	
		$D_{55^\circ\text{C}} = 3,72$	
O157:H7		$D_{60^\circ\text{C}} = 1,12$ $D_{65^\circ\text{C}} = 0,05$	
K-12	Caldo BHI	$D_{54^\circ\text{C}} = 7,94$ $D_{58^\circ\text{C}} = 0,55$	Velliou <i>et al.</i> (2010)
G335		Caldo comercial	$D_{54^\circ\text{C}} = 4,5$
	$D_{58^\circ\text{C}} = 1,5$		
	$D_{62^\circ\text{C}} = 0,5$		

O coeficiente térmico  $z$  foi obtido através da curva de destruição térmica da *E. coli*, representada na Figura 17. O valor encontrado foi de  $8,3^\circ\text{C}$ , com coeficiente de determinação de 0,97.

Assim, é necessária uma diferença de  $8,3^\circ\text{C}$  na temperatura do lodo para provocar uma redução de 90% (1 ciclo logarítmico) no valor de  $D_T$ .

O coeficiente térmico ( $z$ ) encontrado esteve próximo de valores obtidos da literatura, como pode ser observado na Tabela 09.

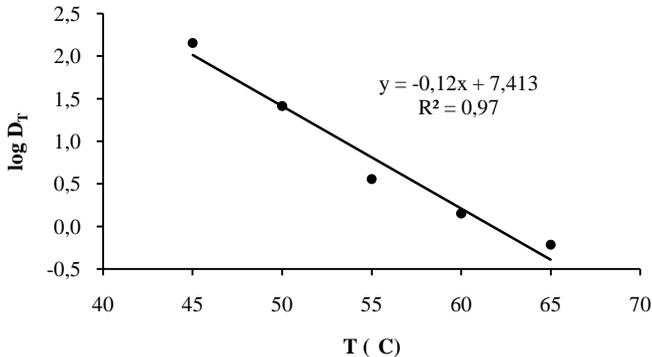


Figura 17: Curva de destruição térmica da *E. coli* em lodo de esgoto.

Tabela 09: Coeficiente térmico (*z*) para *E. coli* em diferentes trabalhos.

Cepa	Meio	<i>z</i> (°C)	Referência
K-12	Caldo BHI	6,5	Chung, Wang, Tang (2007)
G335	Caldo comercial	7,9	Oteiza, Giannuzzi, Califano (2003)
O157:H7	Caldo comercial	7,8	Califano (2003)
K-12	Suco de maçã	4,7	Yuk <i>et al.</i> (2009)

De acordo com WHO (2006), o número de coliformes termotolerantes geralmente encontrados em efluentes domésticos pode chegar até  $10^9$  NMP/100ml. Considerando a diretriz da Organização Mundial da Saúde (Tabela 03), onde estabelece que o efluente deva ter menos de  $10^3$  NMP/100ml de *E. coli* para ter aplicações no cultivo de raízes ou culturas de baixo crescimento, têm-se que seriam necessárias a redução de pelo menos 6 (seis) unidades logarítmicas desse parâmetro para o efluente tornar-se apto à utilização agrícola.

Através do modelo de Arrhenius (Equação (07)) foi determinado a dependência da taxa de inativação ( $k_d$ ) com a temperatura. E pela Equação (04), pode-se estimar o tempo necessário para inativação de um determinado número de microrganismo, desde que se conheça o valor de  $k_d$ . Assim, através dessas relações construiu-se a Figura 18, que expressa a relação tempo-temperatura para redução de 6 unidades logarítmicas de *E. coli*, entre 45°C e 65°C, em intervalos de 1°C.

Da Figura 18 podem ser obtidos diversos parâmetros com relação à *E. coli*, úteis na operação de sistemas de desinfecção térmica. Por exemplo, em 55°C são necessários 40,1 minutos para reduzir 6 unidades

logarítmicas no número desse microrganismo. E em 60°C, esse tempo é reduzido para apenas 10,3 minutos.

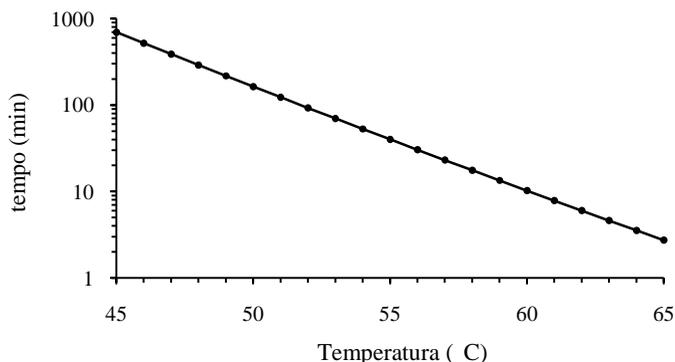


Figura 18: Estimativa das relações tempo-temperatura para redução de 6 (seis) unidades logarítmicas de *E. coli* em lodo de esgoto.

De modo geral, os testes de inativação térmica da *E. coli* e os parâmetros cinéticos encontrados indicam que a desinfecção microbiana do lodo de esgoto pode atingir níveis consideráveis em temperaturas acima de 55°C. Obviamente, para efetivação da segurança de um processo de inativação térmica, a cinética de destruição de outros microrganismos indicadores também deve ser avaliada.

### 5.3 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE DESINFECÇÃO DO LODO UTILIZANDO ENERGIA TÉRMICA DE COLETORES SOLARES PLANOS

#### 5.3.1 Condições Meteorológicas

Foram realizados 20 ensaios no reator de desinfecção com energia solar, os quais foram distribuídos ao longo do período de dezembro/2009 a julho/2010, em condições meteorológicas favoráveis, com predomínio de sol (céu aberto), e desfavoráveis, com o céu encoberto e pouca disponibilidade de radiação solar (ver Quadro 03). As curvas de irradiação solar do período de cada ensaio são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 10: Estatísticas descritivas dos dados de irradiação solar (em  $W.h.m^{-2}$ ) em cada ensaio.

Estação		PRIMAVERA					
Condição do céu		Aberto		Aberto		Aberto	
Dia do ensaio		3/12/09		7/12/09		20/12/09	
Média Período		798		734		867	
Desvio Padrão		273		313		195	
Mediana		889		793		908	
Máx.		1055		1060		1086	
Mín.		227		186		506	
Média dia		333		306		366	

Estação		VERÃO					
Condição do céu	Encoberto	Encoberto	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto
Dia do ensaio	16/1/10	23/1/10	30/1/10	6/2/10	20/2/10	13/3/10	
Média Período	374	472	574	775	745	537	
Desvio Padrão	202	175	233	204	251	259	
Mediana	250	532	514	838	856	515	
Máx.	649	744	923	987	1005	894	
Mín.	171	107	221	440	322	191	
Média dia	159	195	240	317	298	215	

Estação		OUTONO					
Condição do céu	Encoberto	Encoberto	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto
Dia do ensaio	27/3/10	11/4/10	17/4/10	1/5/10	9/5/10	5/6/10	12/6/10
Média Período	356	474	512	529	442	354	253
Desvio Padrão	156	172	204	194	187	176	137
Mediana	411	483	590	579	465	372	209
Máx.	593	671	761	745	707	575	498
Mín.	113	137	170	207	152	81	93
Média dia	139	181	199	203	169	133	96

*Continuação*

Estação	INVERNO			
	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto
Condição do céu	Aberto	Aberto	Aberto	Aberto
Dia do ensaio	27/6/10	3/7/10	25/7/10	31/7/10
Média Período	400	405	417	415
Desvio Padrão	174	171	161	201
Mediana	456	468	393	485
Máx.	594	594	629	631
Mín.	142	141	184	89
Média dia	151	153	159	156

A Tabela 10 apresenta as estatísticas descritivas dos dados de irradiação solar de cada ensaio, sendo a média do período (09h00min às 17h00min), desvio padrão, mediana, valor máximo e mínimo e a média por hora considerando todo o dia (com 24 pontos das 0h00min às 23h00min).

Observa-se que os ensaios realizados em dezembro e fevereiro tiveram a irradiação solar média do período acima de  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ , que foi a condição máxima obtida. O restante dos ensaios do verão e outono até 01/maio, realizados em condições de céu aberto, tiveram a irradiação média entre  $500$  e  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ , representando uma condição intermediária no tratamento. E os demais, aqueles realizados após 09/maio em condições de céu aberto e aqueles realizados com o céu encoberto no verão e outono, tiveram a irradiação solar média inferior a  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , consistindo nas piores condições para o tratamento térmico.

Para os dias dos ensaios realizados nos meses de dezembro e fevereiro, a irradiação solar atingiu picos que variaram de  $894$  a  $1086 \text{ W.h.m}^{-2}$  (Tabela 10). Já nos ensaios realizados nos meses de junho e julho as máximas ficaram entre  $498$  e  $631 \text{ W.h.m}^{-2}$ , ou seja, mesmo em condições meteorológicas favoráveis, a energia solar disponível na superfície da terra é bastante reduzida em determinadas épocas do ano, o que influencia fortemente o seu aproveitamento térmico.

De acordo com o Atlas de Irradiação Solar do Brasil (COLLE e PEREIRA, 1998), Florianópolis está em uma das regiões do país que possui a menor média anual típica de radiação solar global. Regiões como o Nordeste e Centro-Oeste possuem os maiores índices, com

menores variabilidades mensais, apresentando mais potencial na utilização térmica da energia solar.

A Tabela 11 apresenta os dados de insolação e a temperatura média do ar no período de cada ensaio. Nos meses de dezembro a março, os dias quentes facilitaram o processo de aquecimento, pois as perdas de calor para o ambiente eram menores. As maiores medições de insolação foram registradas em dezembro e fevereiro. Podem-se observar também as baixas medições de insolação nos dias com céu encoberto.

Tabela 11: Insolação (h) e temperatura média do ar (°C) para o período de realização dos ensaios.

Ensaio	Data	Tar	Insolação	Ensaio	Data	Tar	Insolação
1	03/dez	30	10,1	11	11/abr	23	5,9
2	07/dez	29	8,7	12	17/abr	25	8,3
3	20/dez	29	11,9	13	01/mai	26	10,1
4	16/jan	25	3,5	14	09/mai	23	8,9
5	23/jan	25	2,8	15	05/jun	23	7,4
6	30/jan	30	8,7	16	12/jun	21	4,8
7	06/fev	34	11,0	17	27/jun	24	9,1
8	20/fev	30	10,7	18	03/jul	24	8,7
9	13/mar	31	7,6	19	25/jul	24	8,7
10	27/mar	27	1,6	20	31/jul	25	7,4

### 5.3.2 Temperatura do Lodo

A temperatura do lodo foi monitorada em três pontos do reator (o monitoramento consta no Apêndice E), trabalhou-se com a média desses pontos. Nas Figuras 19 a 23 é apresentada a evolução da temperatura média do lodo durante cada ensaio, realizados no mesmo período do dia (09h00min as 17h00min). Em todos os casos o perfil descrito foi semelhante, o que permitiu o ajuste das curvas com o modelo sigmoidal de Boltzmann, conforme descrito na Equação (14).

$$T_{predito}(t) = \frac{A_o - A_f}{1 - e^{(t-x_o)/dx}} + A_f \quad (14)$$

Onde  $A_o$  representa a assíntota inferior,  $A_f$  a assíntota superior,  $x_o$  o ponto de inflexão da curva,  $dx$  a inclinação da curva e  $t$  o tempo medido em minutos. Os parâmetros do modelo para cada ensaio foram obtidos no programa *Origin*<sup>®</sup>.

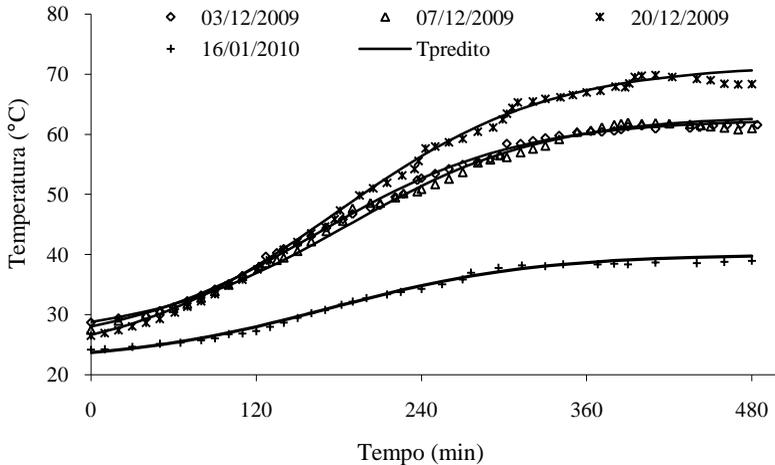


Figura 19: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e a temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoideal para os ensaios realizados nos dias 03, 07 e 20/dez e 16/jan.

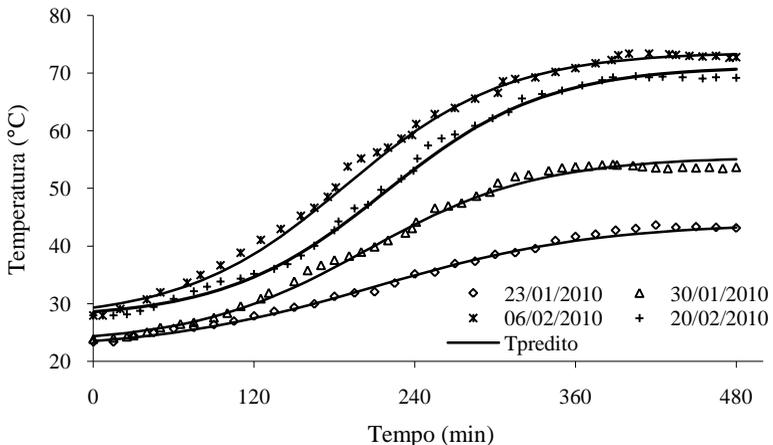


Figura 20: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoideal para os ensaios realizados nos dias 23 e 30/jan e 06 e 20/fev.

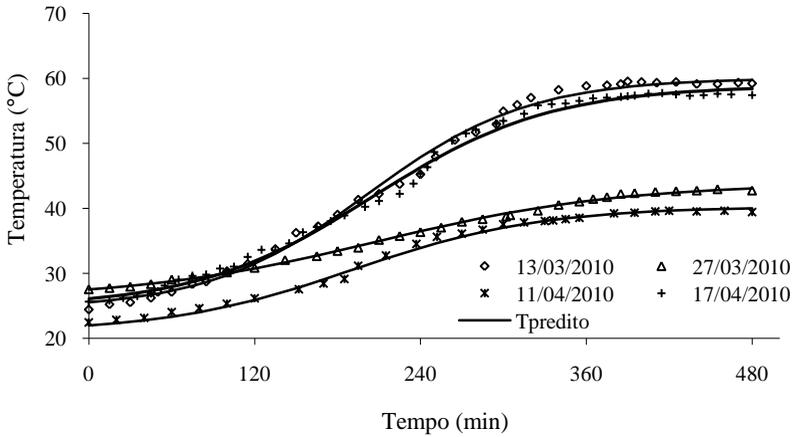


Figura 21: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 13 e 27/mar e 11 e 17/abr.

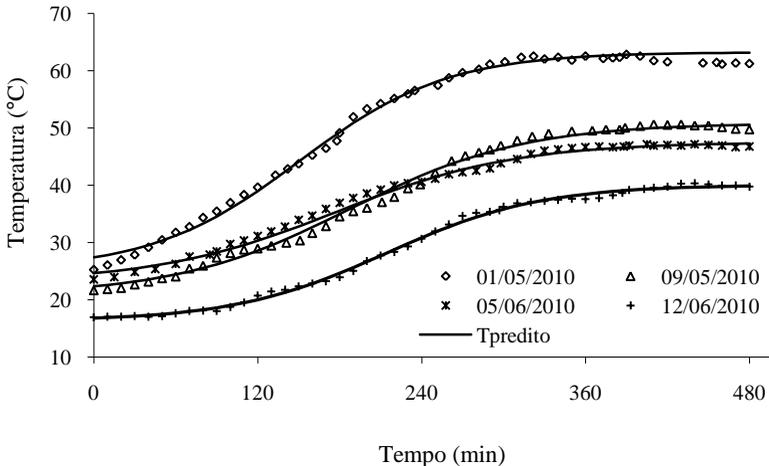


Figura 22: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 01 e 09/mai e 05 e 12/jun.

Verifica-se que em condições meteorológicas favoráveis a temperatura do lodo atinge níveis consideráveis que favorecem a desinfecção, chegando em alguns casos ficar acima de  $70^{\circ}\text{C}$  (ensaios de dezembro e fevereiro, Figuras 19 e 20, respectivamente), que é uma das

temperatura mais utilizada em processos de desinfecção (HAUG, 1993, Fytili e Zabaniotou, 2008).

Até o dia 01/mai, todos os ensaios realizados em condições de céu aberto, com exceção dos dias 30/jan e 17/abr, atingiram temperaturas médias superiores a 60°C por mais de 2 horas.

A presença excessiva de nuvens no céu diminui a radiação solar disponível, comprometendo a elevação da temperatura, conforme pode ser observado nas curvas dos ensaios do dia 16 e 23/jan, 27/mar e 11/abr, presente nas Figuras 19, 20 e 21, respectivamente.

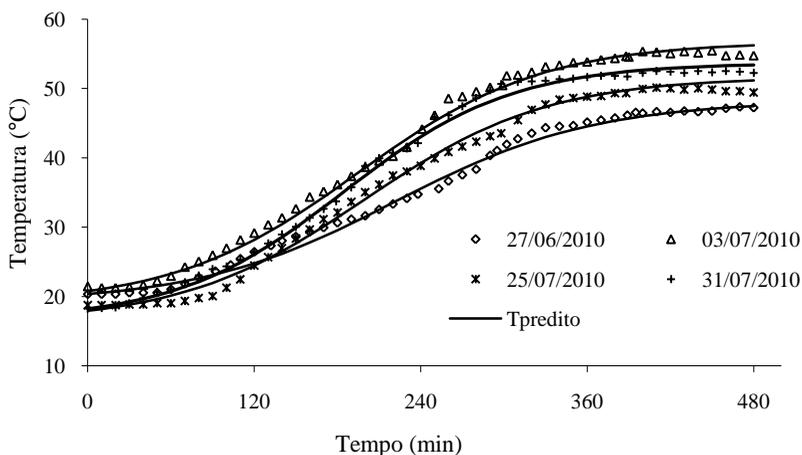


Figura 23: Temperatura média do lodo observada ( $T_{obs.}$ ) e temperatura estimada ( $T_{predito}$ ) pelo modelo sigmoidal para os ensaios realizados nos dias 27/jun e 03, 25 e 31/jul.

Apesar dos ensaios posteriores ao dia 01/maio serem realizados em condições de céu aberto, a chegada do outono/inverno e a diminuição da radiação solar decorrente da mudança da posição da terra com relação ao sol, influenciou na temperatura do lodo, a qual ficou inferior a 55°C ( $T_{médio}$ ) nestes os ensaios. No mês de junho as temperaturas ficaram inferiores a 50°C, o que pode ser insuficiente para o tratamento do lodo (Figuras 22 e 23).

Os parâmetros do modelo de predição da temperatura em cada ensaio, conforme Equação (14), e seus respectivos erros são apresentados na Tabela 12. O modelo foi aplicado aos dados na temperatura absoluta.

Tabela 12: Estimativa dos parâmetros do modelo ajustado aos dados de temperatura do lodo (em Kelvin), erro-padrão e o coeficiente de determinação para cada ensaio.

Ensaio	Parâmetros								
	$A_o$	Erro	$A_f$	Erro	$x_o$	Erro	dx	Erro	$R^2$
03/12/2009	297,54	0,72	335,67	0,24	163,82	3,12	72,71	2,52	0,998
07/12/2009	299,21	0,95	336,32	0,40	184,39	4,32	72,56	3,96	0,995
20/12/2009	295,17	1,01	344,72	0,44	177,02	3,56	77,72	3,35	0,997
16/01/2010	295,23	0,67	313,17	0,31	173,18	6,23	74,71	6,10	0,992
23/01/2010	295,04	0,66	317,17	0,45	210,62	5,64	82,75	6,55	0,995
30/01/2010	296,20	0,62	328,62	0,38	203,85	3,44	63,93	3,58	0,994
06/02/2010	300,56	0,80	346,81	0,39	188,58	2,92	60,19	2,86	0,996
20/02/2010	300,62	0,57	344,36	0,45	217,75	2,46	59,81	2,63	0,997
13/03/2010	297,63	0,65	333,22	0,41	202,06	3,46	58,20	3,38	0,995
27/03/2010	299,14	0,37	317,03	0,26	209,15	3,86	88,28	4,76	0,998
11/04/2010	294,07	0,54	313,45	0,29	191,34	5,02	67,59	4,96	0,994
17/04/2010	297,95	0,65	332,04	0,41	205,59	3,48	64,11	3,57	0,994
01/05/2010	298,36	0,87	336,38	0,29	150,41	3,43	54,13	2,86	0,994
09/05/2010	294,02	0,65	324,00	0,33	187,46	3,76	63,80	3,65	0,994
05/06/2010	296,29	0,70	320,68	0,28	177,38	4,72	65,76	4,20	0,993
12/06/2010	289,44	0,24	313,26	0,17	214,53	1,91	55,99	1,88	0,998
27/06/2010	292,24	0,63	321,38	0,49	221,33	4,25	71,67	4,70	0,992
03/07/2010	291,98	0,65	329,88	0,36	194,49	3,09	66,61	3,06	0,996
25/07/2010	289,47	0,68	324,81	0,41	199,57	3,51	66,04	3,58	0,995
31/07/2010	289,68	0,60	326,82	0,30	184,67	2,76	60,58	2,62	0,996

O ajuste do modelo sigmoidal aos dados de temperatura mostrou-se satisfatório, conforme pode ser observado pelos valores do erro-padrão de cada parâmetro.

O coeficiente de determinação foi elevado em todos os ensaios, ficando acima de 0,99. No entanto, conforme Motulsky e Christopoulos (2003) e Ratkowsky (1990), tal coeficiente não deve ser usado como principal parâmetro de avaliação do ajuste em modelos não-lineares. Valores altos de  $R^2$  indicam que a curva estimada se aproximou dos valores experimentais. Porém, esses modelos podem apresentar elevados

valores de  $R^2$  mesmo havendo grandes discrepâncias entre os valores estimados e observados.

Os resíduos das temperaturas ( $T_{\text{obs.}} - T_{\text{predito}}$ ) foram baixos, ficando entre os extremos  $-2,6^\circ\text{C}$  e  $2,9^\circ\text{C}$ , o que é aceitável perante as condições experimentais do processo.

### 5.3.3 Eficiência do Processo na Desinfecção de Lodo ao Longo do Ano

A eficiência do tratamento foi medida com base na concentração de *Escherichia coli* e coliformes totais no lodo de esgoto antes e depois do tratamento. O parâmetro utilizado foi o logaritmo negativo da fração de sobreviventes ( $-\log(N_f/N_o)$ ), equivalente à redução microbiana ( $\log N_o - \log N_f$ ).

A Figura 24 mostra a redução de *E. coli* nos ensaios realizados com céu aberto entre dezembro/2009 e julho/2010, além da irradiação solar média no período do experimento. Observam-se reduções consideráveis de *E. coli*, entre 4,2 e 7,1 unidades logarítmicas para os ensaios realizados entre 03/dez e 01/mai, onde a irradiação solar média esteve acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

Para os ensaios realizados entre 09/mai e 31/jul, a desinfecção do lodo foi comprometida pela baixa radiação solar disponível, cuja média no período de cada ensaio ficou abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ . O valor máximo atingido na inativação foi de 2,3 unidades logarítmicas.

A fim de se verificar as diferenças na desinfecção do lodo sob as diferentes condições obtidas ao longo do ano, realizou-se análise de variância com os dados de inativação agrupados em três faixas de irradiação solar: maior que  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ ; entre 500 e  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ ; e abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

As faixas de irradiação utilizadas correspondem à média do período do tratamento (09h00min às 17h00min), e não às 24 horas do dia. Utilizou-se o teste Tukey na comparação dos dados.

A análise de variância revelou, ao nível de significância de 5%, que a inativação de *E. coli* não difere nos ensaios realizados com irradiação solar média acima de  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$  e entre 500 e  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ , no entanto, ambos diferem significativamente dos ensaios realizados com irradiação solar média inferior a  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

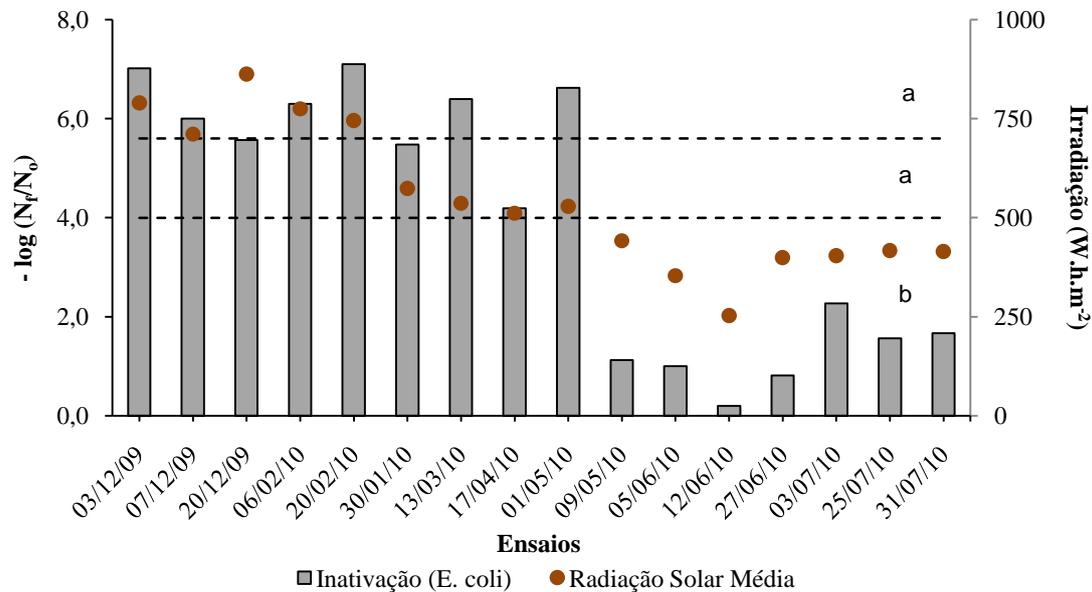


Figura 24: Inativação de *E. coli* (redução de unidades logarítmicas) nos ensaios realizados em dias com céu aberto ao longo do ano, e a irradiação solar média incidente no período de cada ensaio.

Letras iguais indicam que não há diferença na desinfecção ao nível de significância de 5% entre as faixas de irradiação solar.

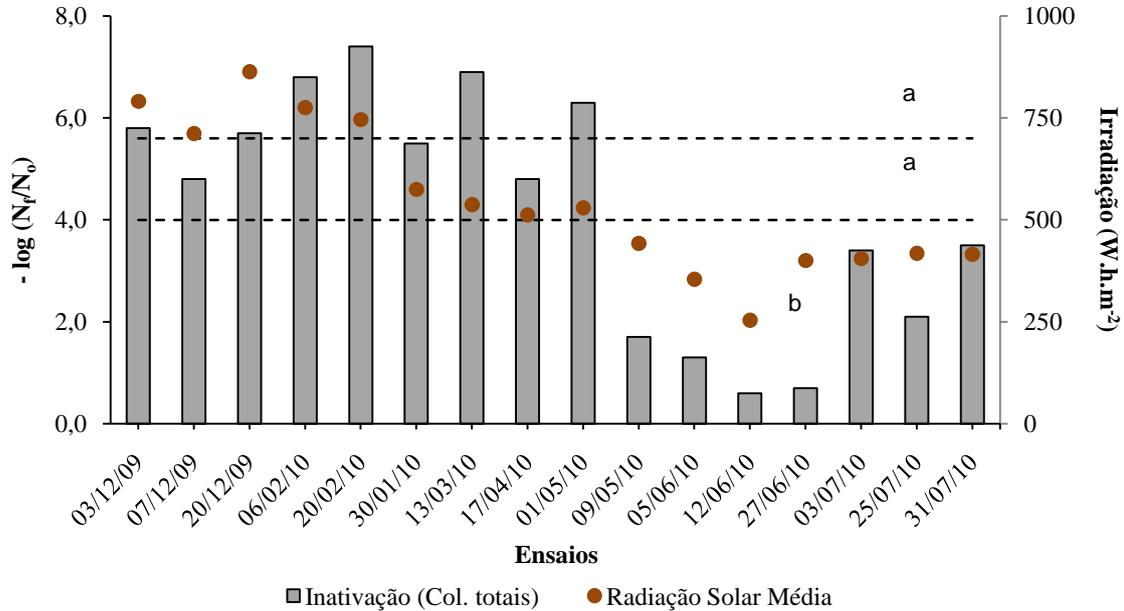


Figura 25: Inativação de coliformes totais (redução de unidades logarítmicas) nos ensaios realizados em dias com céu aberto ao longo do ano, e a irradiação solar média incidente no período de cada ensaio. Letras iguais indicam que não há diferença na desinfecção ao nível de significância de 5% entre as faixas de irradiação solar.

Com relação a coliformes totais o cenário é semelhante, a Figura 25 traz a redução microbiana desse parâmetro nos ensaios realizados entre dezembro e julho, em condições de céu aberto. Observa-se que nos ensaios com irradiação solar média acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , a redução ficou entre 4,8 e 7,4 unidades logarítmicas, indicando que o processo foi eficiente eliminando grande quantidade desses microrganismos. No entanto, a redução de coliformes totais em ensaios com irradiação solar média inferior a  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$  foi prejudicada, o valor máximo atingido foi de 3,5 unidades logarítmicas.

Também para coliformes totais, o teste Tukey revelou que não houve diferença significativa entre os tratamentos realizados com irradiação acima de  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$  e entre 500 e  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ . No entanto, a inativação de coliformes totais nesses ensaios diferiu significativamente dos realizados na faixa de irradiação inferior a  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

O processo mostrou-se eficiente na eliminação de coliformes totais e *E. coli* nas situações onde a irradiação solar média para o período de tratamento ficou acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ . Porém, mesmo para uma condição de céu aberto, onde não há interferências atmosféricas consideráveis, o processo de desinfecção não foi eficiente em todas as épocas do ano.

Pela Figura 14, observa-se que os piores índices de radiação solar em Florianópolis estão entre maio e agosto. Nesses meses, conforme evidenciado nas Figuras 24 e 25, o reator de desinfecção do lodo com energia solar pode ser comprometido, necessitando de outras fontes de energia para suprir as necessidades do processo.

Assim, a energia solar nesses casos poderia ser complementar, diminuindo o consumo de outras fontes, como energia elétrica ou vapor, que são dispendiosas sob o aspecto econômico e ambiental.

É oportuno relatar que tal análise é válida apenas para Florianópolis ou cidades cujas características climáticas sejam semelhantes. De acordo com Colle e Pereira (1998) (Figura 06), a região litorânea do Sul do Brasil é a que possui o menor índice de irradiação solar global, onde a média anual típica fica entre 4500 e 4900  $\text{W.h.m}^{-2}$ . Os valores da Figura 06 correspondem à integral da área sob curva típica anual ao longo do dia. Dividindo-se esses valores por 24 para obter um parâmetro médio em uma hora, têm-se 187,5 a 204,2  $\text{W.h.m}^{-2}$ .

Tais dados estão de acordo com as médias horárias apresentadas na Tabela 10, cujos mínimos e máximos para dias ensolarados foram de 199 e 366  $\text{W.h.m}^{-2}$  no período de 03/dezembro a 01/maio; e 96 a 203  $\text{W.h.m}^{-2}$  no período de 09/maio a 31/julho.

Através da Figura 06, é possível observar ainda que algumas regiões do Brasil, como Nordeste e Centro-Oeste possuem alto potencial de utilização de energia solar, cuja média anual típica de irradiação fica entre 5500 e 6100 W.h.m<sup>-2</sup>, novamente dividindo por 24 teríamos uma média horária de 229,2 a 254,2 W.h.m<sup>-2</sup>. Ou seja, a média anual do Nordeste e Centro-Oeste fica entre a faixa de valores encontrados para o verão na região de Florianópolis.

Deve-se considerar que a variabilidade mensal da irradiação nessas regiões é inferior à do Sul do Brasil, tornando o aproveitamento da energia solar ao longo do ano mais homogêneo.

Sendo assim, o processo de desinfecção de lodo com energia solar poderia ter uma aplicabilidade ainda maior nessas regiões, principalmente considerando o fato de que esses Estados possuem forte vocação agrícola e carecem de soluções efetivas para o saneamento básico, e o reciclo de água e nutrientes presentes nos esgotos poderiam contribuir para o desenvolvimento local.

#### 5.3.4 Eficiência do Processo na Desinfecção do Lodo em Dias com Céu Encoberto

Conforme já observado nas Figuras 24 e 25, os ensaios realizados em dias ensolarados entre 03/dezembro e 01/maio apresentaram eficiências elevadas, deixando o lodo praticamente isento de coliformes fecais e totais. Resta avaliar se o desempenho do reator é o mesmo se considerado os dias com o céu encoberto nesse mesmo período do ano.

Para avaliação dessa condição, os dados de inativação microbiana nos ensaios do dia 16 e 24/jan, 27/mar e 11/abr, realizados em dias com o céu encoberto, foram comparados com os demais através das Figuras 26 e 27.

Os resultados para *E. coli* (Figura 26), mostram que a redução obtida em dias com baixa incidência de radiação solar ficou entre 0,4 e 0,9 unidades logarítmicas, valores extremamente baixos se comparado com os demais, que ficaram entre 4,2 e 7,1 unidades.

Já era esperada uma redução na eficiência do reator em dias com céu encoberto. De acordo com Bezerra (1986), a radiação difusa pode representar 50% da radiação global em dias parcialmente nublados e 100% em dias completamente cobertos, o que dificulta a sua captação e conversão em energia térmica.

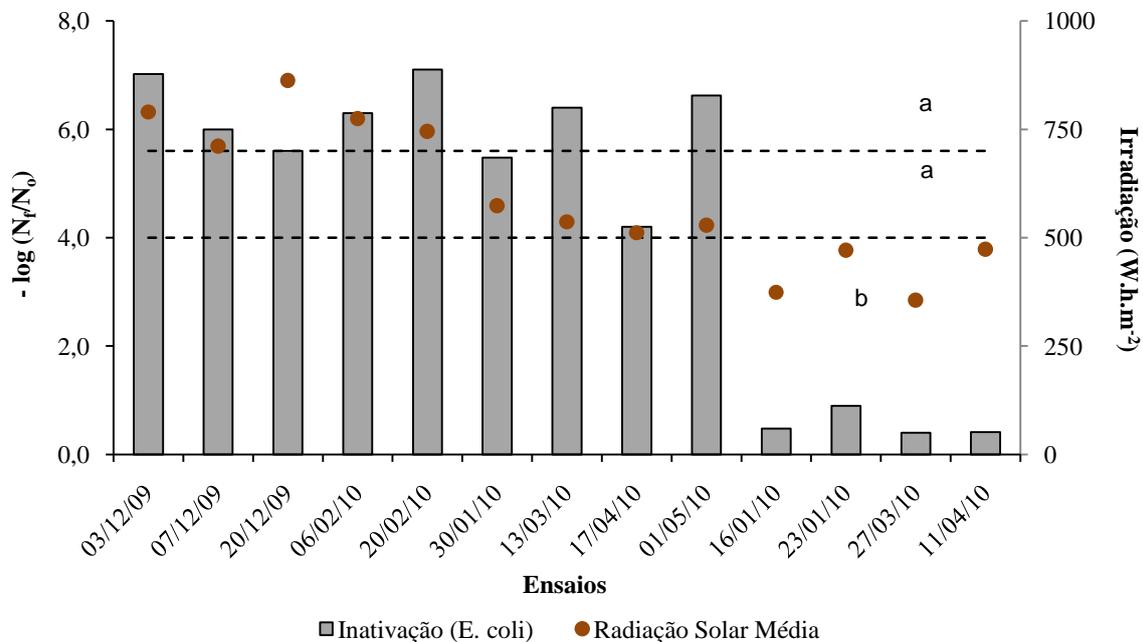


Figura 26: Comparação da inativação de *E. coli* (redução de unidades log.) nos ensaios realizados em dias com céu aberto e dias com céu encoberto entre dez/09 a abr/10, e a respectiva irradiação solar média incidente no período de cada ensaio. Letras iguais indicam que não há diferença na desinfecção ao nível de significância de 5% entre as faixas de irradiação solar.

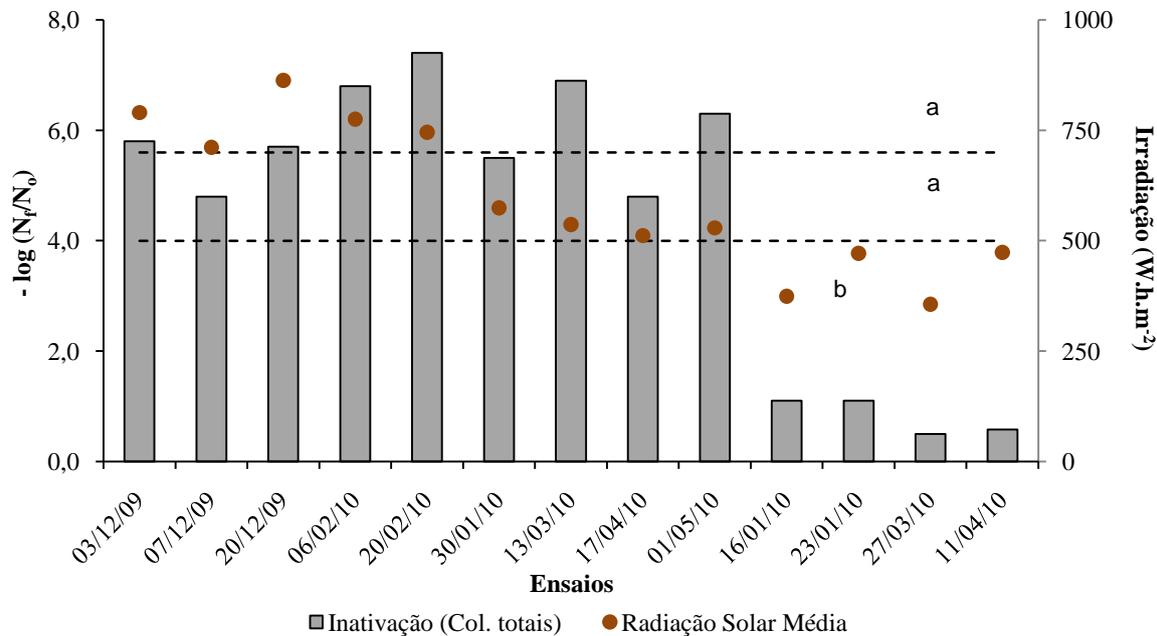


Figura 27: Comparação da inativação de coliformes totais (redução de unidades log.) nos ensaios realizados em dias com céu aberto e dias com céu encoberto entre dez/09 e abr/10, e a respectiva irradiação solar média incidente no período de cada ensaio. Letras iguais indicam que não há diferença na desinfecção ao nível de significância de 5% entre as faixas de irradiação solar.

Para coliformes totais a situação foi semelhante, a inativação em dias com céu encoberto ficou entre 0,5 e 1,1 unidades logarítmicas, enquanto nos demais ensaios variaram entre 4,8 e 7,4 unidades.

Na Tabela 10, observa-se que a irradiação solar média no período dos ensaios realizados em dias com céu encoberto ficou abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ . Pelo teste Tukey, agrupando novamente os ensaios em três faixas de radiação, verifica-se que a inativação de *E. coli* e coliformes totais em dias com valores médios acima de  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ , não difere ao nível de significância de 5%, da inativação dos ensaios realizados em dias com irradiação entre  $500$  e  $700 \text{ W.h.m}^{-2}$ , mas ambos diferem significativamente daqueles realizados em dias com céu encoberto ( $< 500 \text{ W.h.m}^{-2}$ ).

### 5.3.5 Recrescimento Microbiano

Um fator que pode limitar a desinfecção térmica é a capacidade que certas bactérias e esporos apresentam de serem reativados em matéria orgânica quando as temperaturas são reduzidas a níveis subletais. De acordo com Haug (1993), esse fenômeno tem sido observado com coliformes totais e fecais, *salmonella* e *streptococcus* fecal em lodo líquido ou mesmo em composto com baixa umidade.

Um microrganismo é considerado morto quando perde a capacidade de se reproduzir a um nível detectável em condições ótimas de cultura. Parâmetros como idade da célula, estágio de crescimento, temperatura, pH, condições nutricionais, além de antibióticos e inibidores presentes no meio influenciam diretamente a auto-recuperação de células ou esporos após o tratamento térmico (PFLUG, HOLCOMB, GÓMEZ, 2001).

A Figura 28 mostra o logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) de *E. coli* e o recrescimento após 24 horas do término do tratamento, para os ensaios realizados com irradiação solar média acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ . Os valores das concentrações foram convertidos para NMP por gramas de sólidos totais (ST) com base nas análises de sólidos do Apêndice A.

Observa-se que a concentração final para esses ensaios foi praticamente nula, apenas nos dias 20/dez e 17/abr foram detectados um residual de *E. coli* ao final do tratamento. O recrescimento após 24 horas não foi expressivo, indicando a eficácia do tratamento térmico.

Com relação ao ensaio do dia 03/dez, apesar de na contagem final do tratamento não ter sido detectado células viáveis, após 24 horas houve o reaparecimento de uma considerável carga microbiana. No

entanto, a temperatura desse ensaio, conforme observado na Figura 19 foi semelhante aos demais naquele mês, ficando acima de 60°C por mais de 2 horas, e o recrescimento microbiano excessivo pode ter sido um fato isolado, visto que de nove ensaios apenas um manifestou esse comportamento.

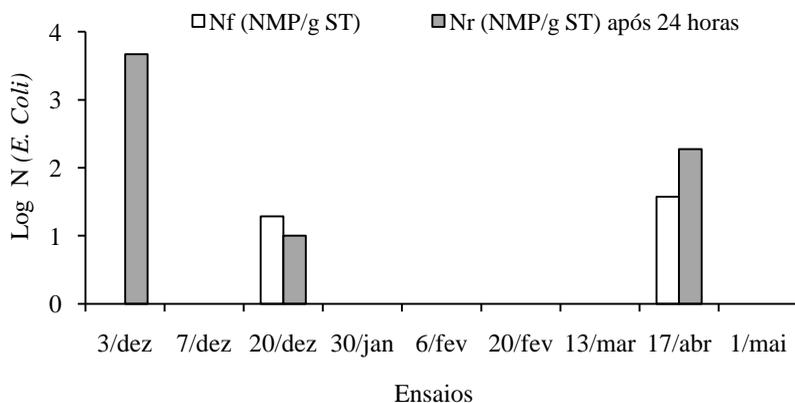


Figura 28: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ )<sup>3</sup> e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para *E. coli* nos ensaios com irradiação solar média acima de 500 W.h.m<sup>-2</sup>.

Com base na Figura 28 pode-se afirmar que o tratamento térmico de desinfecção nessas condições de radiação solar, mostrou-se apto a atender o que é estabelecido na Resolução nº 375/2006 do CONAMA para lodo classe A (Quadro 01) com relação ao parâmetro analisado, isso assumindo que a concentração de coliformes termotolerantes esteja próxima à de *E. coli* no material em estudo. Com exceção da amostra do dia 03/dez, todas apresentaram valores de *E. coli*, abaixo de 10<sup>3</sup> NMP/g de ST.

Para caracterização do lodo como classe A, ainda seriam necessários análises de *Salmonella*, dos principais vírus entéricos e de ovos de helmintos. Com relação a *Salmonella*, o limite estabelecido pela legislação é a ausência em 10 g de ST e para vírus menos de 0,25 UFP ou UFF/g de ST. Conforme dados da literatura, a resistência ao calor desses organismos varia muito conforme as condições de cada estudo, no entanto, apresentam-se semelhantes às da *E. coli*.

<sup>3</sup> Para as amostras onde não foi detectado *E. coli* ou coliformes totais, assumiu-se  $N = 1$  NMP/g de ST, assim  $\log N$  é igual a zero.

Spinks *et al.* (2006), em estudo sobre a destruição térmica de indicadores bacterianos em água, obteve os seguintes valores do tempo de redução decimal para *Enterococcus faecalis*:  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 15$  min;  $D_{60^{\circ}\text{C}} = 2,18$  min. Para *Salmonella typhimurium* os valores foram inferiores, indicando uma menor resistência:  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 1,28$  min;  $D_{60^{\circ}\text{C}} = 0,067$  min. A *Escherichia coli* O3:H6, apresentou uma resistência intermediária:  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 6,7$  min;  $D_{60^{\circ}\text{C}} = 0,85$  min. O autor indica o tratamento de inativação microbiana da água à  $60^{\circ}\text{C}$ , visto que nessa temperatura, todas as bactérias avaliadas apresentaram baixa resistência ao calor.

Mocé-Llivina *et al.* (2003), relatam a redução de 6 unidades logarítmicas de *E. coli* e 3,4 unidades de *Streptococcus fecal* após tratamento de esgoto sob  $60^{\circ}\text{C}$  por 30 min. O mesmo estudo avaliou ampla variedade de enterovírus e bacteriófagos, sendo que esse mesmo tratamento foi capaz de reduzir 5,4 unidades logarítmicas de Poliovirus1 e 5,1 unidades de Cocksackievirus B4.

Em estudo de Gabriel e Nakano (2009), as cepas de *E. coli* mostraram-se mais resistentes que as de *Salmonella*. Nos testes utilizando como meio uma solução salina tampão, o valor de  $D_{55^{\circ}\text{C}}$  para *E. coli* 0157:H7 foi de 2,55 min, enquanto para *S. enteritidis* foi de 0,66 min.

Lang e Smith (2008) avaliaram a cinética de destruição de diversas cepas de *E. coli* e *Samonella*. Para o tratamento utilizando esgoto como meio, a *E. coli* O158 apresentou maior resistência dentre três cepas avaliadas desse microrganismo, com  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 2,6$  min. A *Salmonella Senftenberg* 775W foi a bactéria mais resistente do estudo, apresentando  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 3,2$  min, enquanto para *Salmonella Oranienburg* o valor medido foi de 2,9 min. Em  $70^{\circ}\text{C}$ , a inativação das bactérias foi praticamente instantânea.

Convém ressaltar que para Lang e Smith (2008), a *E. coli* mostrou ser um indicador robusto de destruição de patógenos bacterianos em processos de tratamento de lodos e, portanto, concluem ser desnecessário exigir um processo de validação baseado especificamente na inativação de um organismo mais resistente ao calor, como a *S. Senftenberg*.

Haug (1993) indica a redução de até 6 unidades logarítmicas de bactérias entéricas tipo coliformes e *Salmonella*, caso o produto seja mantido em  $60^{\circ}\text{C}$  por 30 minutos.

No presente estudo (Tabela 07), o tempo de redução decimal encontrado para *E. coli* à  $60^{\circ}\text{C}$  foi 1,41 min. O aquecimento por 11 min a essa temperatura mostra-se suficiente para destruição de até 6 unidades

logarítmica desse microrganismo (conforme mostrado na Figura 18), isso considerando um experimento de laboratório, controlado e em pequena escala.

No reator com aquecimento solar, os melhores resultados, isto é, onde o tratamento foi mais efetivo evitando o reaparecimento dos coliformes após 24 horas, foram aqueles cuja temperatura média do lodo permaneceu por pelo menos 1 hora acima de 60°C.

Nas análises de helmintos realizadas na caracterização do lodo em estudo, não foram encontrados ovos viáveis, no entanto, pelas relações de “tempo x temperatura” obtidas nos ensaios com irradiação solar média acima de 500 W.h.m<sup>-2</sup>, há uma grande possibilidade de inativação desses agentes, caso estivessem presentes.

Quanto a esse parâmetro, a Resolução nº 375/2006 do CONAMA, estabelece que o lodo deve apresentar menos de 0,25 ovos viáveis/g de ST para ser enquadrado na classe A, e menos de 10 ovos viáveis/g de ST para classe B.

Aitken *et al.* (2005), avaliando tratamento térmico de biossólido produzido com lodo de um digestor contínuo, indica que não foram mais detectados ovos viáveis de *Ascaris suum* após tratamento em 53°C por 30 minutos. Pecson *et al.* (2007), também em estudos com lodo de esgoto, obtiveram a inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides* após 110 minutos em 50°C.

Haug (1993) coloca que a destruição térmica de ovos de *Ascaris lumbricoides* pode ser obtida após 60 min em 55°C, ou que 30 min em 60°C podem reduzir as concentrações a níveis seguros, mesmo considerando que este é um dos parasitas mais resistentes ao calor.

Simoneti (2006) estudou a cinética de inativação térmica de ovos de *Ascaris suum* em biossólido (aprox. 30 g/L de ST) e indica que não foram detectados ovos viáveis de *Ascaris* após 50 minutos de reação em 55°C. Os valores para os tempos de redução decimal encontrados pela autora foram os seguintes: D<sub>50°C</sub> = 340 min; D<sub>55°C</sub> = 50 min; e D<sub>60°C</sub> = 4,4 min. A energia de inativação determinada foi de 4,37 x 10<sup>5</sup> J.mol<sup>-1</sup>.

O tempo de redução decimal é uma medida que reflete a resistência do organismo ao calor, Sendo assim, observamos conforme os resultados apresentados por Simoneti (2006) e Aitken *et al.* (2005), além dos dados da cinética de inativação da *E. coli* apresentados nesse trabalho, que os ovos de *Ascaris* podem apresentar maior resistência ao calor. No entanto, mesmo sendo mais resistente, a sua inativação em

temperaturas acima de 60°C ocorreu rapidamente nos estudos abordados.

Apesar da variabilidade dos dados disponíveis na literatura sobre a inativação térmica de ovos de helmintos, o que pode ser devido às características físico-químicas do meio e dos métodos de detecção aplicados em cada estudo, observa-se uma concordância no fato de que o tratamento em 60°C por pelo menos 1 hora ou em temperaturas próximas a 70°C por 30 min, podem provocar a redução significativa desse agente.

Observamos nas Figuras 19 a 23 que o reator com aquecimento solar, nas condições operadas, pode atingir esses níveis de temperatura desde que a irradiação solar incidente mantenha uma média de pelo menos 500 W.h.m<sup>-2</sup> num período de oito horas de tratamento. Sendo assim, pode-se inferir que o processo proposto poderia contribuir consideravelmente na redução de ovos de helmintos e outros agentes patogênicos como *Salmonella* e vírus entéricos, que podem estar presentes no lodo de esgoto e causam sérios danos à saúde humana, atingindo principalmente países em precárias condições de higiene e saneamento.

O tratamento no reator com aquecimento solar tem grande potencial na complementação do tratamento de outros processos, como a digestão anaeróbia, compostagem, leitos de secagem entre outros, aumentando ainda mais a segurança na higienização do lodo, essencial para aplicação agrícola, cuja recomendação mais sensata é a de utilização de lodo classe A.

A Figura 29 apresenta o logaritmo da concentração final e o recrescimento após 24 horas do tratamento para a *E. coli* nos ensaios realizados com irradiação solar abaixo de 500 W.h.m<sup>-2</sup>. Tais ensaios correspondem àqueles realizados em dias de céu encoberto e os realizados com céu aberto após o dia 09/maio.

Todos os ensaios apresentaram ao final do tratamento mais de 3 unidades logarítmicas em NMP/g de ST. Quase todas as amostras apresentaram recrescimento após 24 horas. As concentrações ficaram entre 10<sup>5</sup> e 10<sup>7</sup> NMP/g de ST, com exceção do ensaio realizado em 05/junho que apresentou uma concentração menor de aproximadamente 2 x 10<sup>3</sup> NMP/g de ST.

Pela Resolução nº 375/2006, é aceitável como lodo classe B aquele material cuja concentração de coliformes termotolerantes seja inferior a 10<sup>6</sup> NMP/g de ST, e que possua menos de 10 ovos viáveis de helmintos por grama de ST. Conforme a Figura 29, o lodo tratado

encontra-se muito próximo desse limite para coliformes (assumindo que a concentração de *E. coli* seja próxima à de coliformes termotolerantes), não sendo seguro categorizá-lo nessa classe.

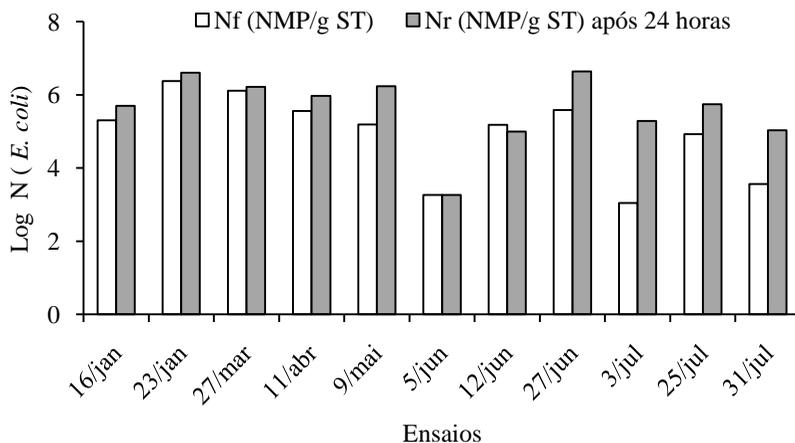


Figura 29: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para *E. coli* nos ensaios com irradiação solar média abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

O recrescimento de coliformes totais foi verificado em um maior número de amostras se comparado com a *E. coli*, o que era esperado em virtude da diversidade de bactérias. Na Figura 30, observa-se a concentração final e o recrescimento de coliformes totais nas amostras dos ensaios realizados com irradiação solar média acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

Pode-se afirmar que a reativação não foi expressiva. Em apenas dois ensaios os valores ficaram acima de  $10^3 \text{ NMP/g}$  de ST.

Paterniani e Silva (2005), num processo tipo SODIS de desinfecção de água com energia solar, obtiveram inativação de *E. coli* e coliformes totais em níveis acima de 99%. De acordo com os autores as amostras tratadas por 4 horas e cuja temperatura média ficou abaixo de  $50^\circ\text{C}$  apresentaram recrescimento microbiano.

Para os ensaios realizados em dias com céu encoberto e aqueles realizados com céu aberto após dia 09/maio (Figura 31), a concentração final para coliformes totais foi elevada devido às baixas reduções ocorridas no tratamento. Nas análises após 24 horas, foram obtidas concentrações entre  $10^5$  e  $10^7 \text{ NMP/g}$  de ST

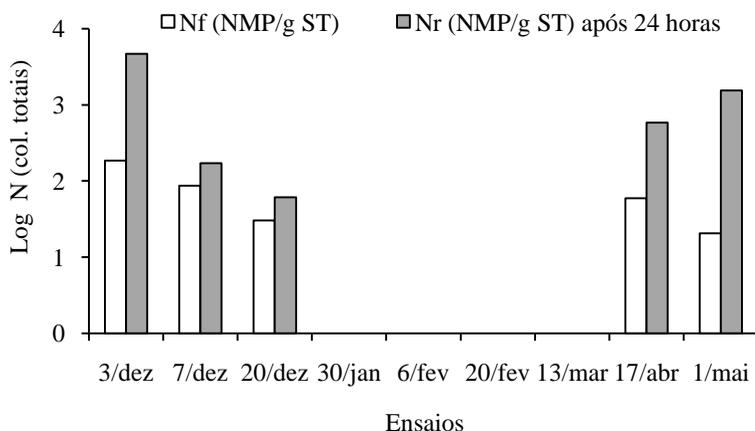


Figura 30: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para coliformes totais nos ensaios com irradiação solar média acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

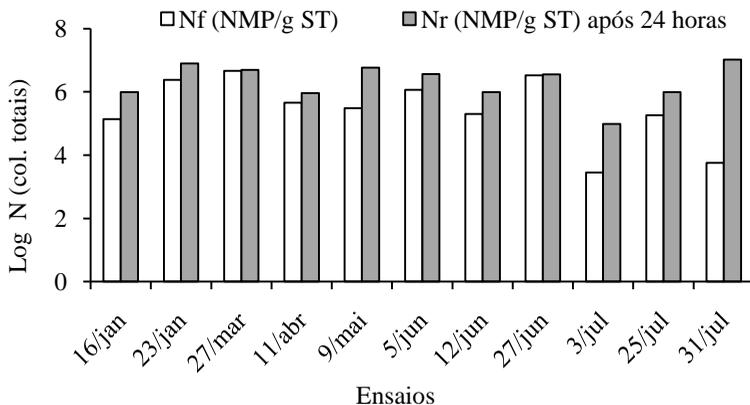


Figura 31: Logaritmo da concentração final ( $N_f$ ) e recrescimento após 24 horas ( $N_r$ ) para coliformes totais nos ensaios com irradiação solar média abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ .

O reator pode apresentar bons resultados desde que observadas as condições de radiação solar. A dimensão na qual ele foi construído pode ser considerada em escala real, visto que se destina ao tratamento descentralizado de lodo. Sendo assim, o Apêndice F traz, numa situação hipotética, o cálculo da estimativa de pessoas que poderiam ser atendidas caso fossem tratadas 80 bateladas de lodo com 200 L cada, ao

longo de um ano. Nessas condições, estimou-se um número de 320 pessoas que poderiam ser beneficiadas. Esse valor pode ser representativo considerando-se aplicações em comunidades rurais, condomínios urbanos, ou mesmo pequenas cidades.

#### 5.4 PREDIÇÃO DA INATIVAÇÃO TÉRMICA DE *Escherichia coli* NO REATOR COM AQUECIMENTO SOLAR ATRAVÉS DO MODELO CINÉTICO DE PRIMEIRA ORDEM

O modelo proposto pela Equação (12) foi resolvido numericamente para cada ensaio no reator, fazendo-se uso dos parâmetros cinéticos de inativação térmica encontrados para a *Escherichia coli* no item 5.2, e os parâmetros para predição da temperatura em função do tempo, descritos na Tabela 12.

Para fins de demonstração, serão analisados neste item a predição da inativação em seis ensaios, sendo dois deles com a irradiação solar média do tratamento acima de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , e dois casos com irradiação abaixo de  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ , todos realizados em dias com céu limpo, além de dois ensaios realizados em dias de céu encoberto. O Apêndice D contém os resultados obtidos para os demais ensaios não apresentados nesse item.

A Figura 32 mostra os resultados obtidos para o ensaio realizado em 03/dez/2009, cuja temperatura ficou acima de  $55^{\circ}\text{C}$  por mais de 3 horas. A irradiação solar média desse período foi elevada,  $798 \text{ W.h.m}^{-2}$ , o que refletiu no ótimo desempenho do sistema na redução microbiana. Tanto pelo modelo quanto pelos dados experimentais, observa-se que em 300 min de tratamento a inativação de *E. coli* foi completa, nesse momento a temperatura do lodo era de aproximadamente  $56^{\circ}\text{C}$  e ainda estava em elevação.

Convém observar que o lodo atingiu  $50^{\circ}\text{C}$  em aproximadamente 230 min, nesse momento a concentração de *E. coli* ainda era elevada, mais de  $2 \times 10^4$  NMP/ml medido experimentalmente e  $1,7 \times 10^3$  NMP/ml através do modelo. A partir dessa temperatura, o tempo de redução decimal ( $D_T$ ) desse microrganismo diminuiu consideravelmente, conforme observado na Tabela 07, passa de 25,93 para 3,61 min em  $55^{\circ}\text{C}$ , e o decaimento na concentração passa a ser mais acentuado.

Pela modelagem, ainda na Figura 32, observa-se que em 260 min de tratamento o lodo estava praticamente isento de *E. coli* (após 30 min de aquecimento acima de 50°C).

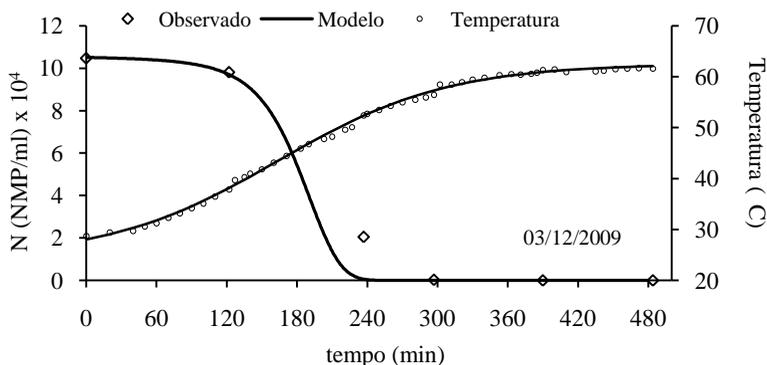


Figura 32: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 03/dez.

A Figura 33 traz a cinética de inativação para uma condição de radiação solar média inferior ao ensaio visto anteriormente, cerca de 574 W.h.m<sup>-2</sup>, porém suficiente para manter a temperatura do lodo acima de 50°C por aproximadamente 3 horas, o que provocou níveis elevados de inativação. Contudo, o tempo requerido para tal foi superior ao da Figura 32.

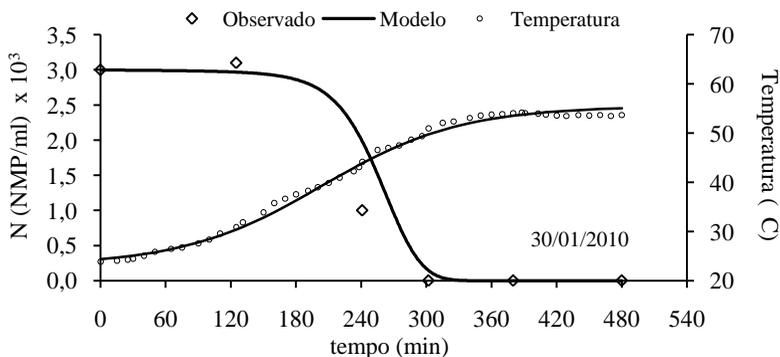


Figura 33: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 30/jan.

Nesse ensaio, o lodo atingiu 45°C em aproximadamente 250 min, quando a concentração de *E. coli* ainda era  $1 \times 10^3$  NMP/ml experimentalmente e  $1,7 \times 10^3$  NMP/ml através do modelo. Para a inativação ser completa foi necessário, aproximadamente, mais 90 min de aquecimento em temperaturas entre 45 e 53°C.

Mesmo a temperatura do lodo estando abaixo de 55°C, que seria o limite frequentemente utilizado pela literatura para inativação da *E. coli* (LANG E SMITH, 2008; HAUG, 1993), o tratamento foi eficiente devido ao tempo de aquecimento e a isolamento térmica do reator, que contribuíram na manutenção de temperatura.

A predição da inativação também foi verificada nos ensaios com baixa eficiência, realizados em dias com o céu aberto, porém com irradiação solar média inferior a  $500 \text{ W.h.m}^{-2}$ . O dia 12/06/2010 (Figura 34) foi característico do outono/inverno no Sul do Brasil, apesar de estar ensolarado, com temperatura média do ar de 21°C, a irradiação média do período foi de apenas  $253 \text{ W.h.m}^{-2}$ , a mais baixa de todos os ensaios, e com insolação de apenas 4,8 horas. Em virtude disso, a temperatura do lodo não passou de 41°C, comprometendo a inativação microbiana.

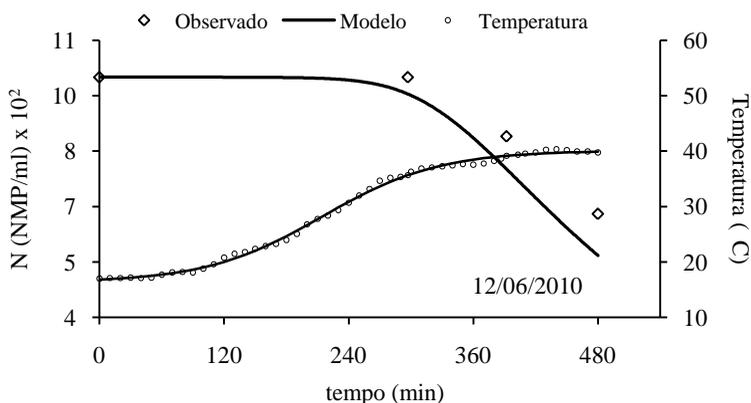


Figura 34: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 12/jun.

Como o lodo era retirado do fundo do tanque séptico através de uma bomba e enviando diretamente para o reator, não foi possível

manter a concentração inicial microbiana constante em todos os ensaios. Neste, por exemplo, a concentração inicial de *E. coli* foi de  $10^3$  NMP/ml, um pouco inferior aos demais. No entanto, isso não comprometeu a modelagem, pois nas equações de cada ensaio a variável  $N_0$  recebeu o seu respectivo valor.

Observa-se na Figura 34, que após 480 min de tratamento a redução de *E. coli* foi insignificante para fins práticos. Com aproximadamente 300 min, a temperatura do lodo atingiu  $36^\circ\text{C}$  e a concentração microbiana sofreu uma pequena queda, insuficiente para fins de higienização do lodo.

Outro caso abordado onde a irradiação solar media esteve baixa ( $400 \text{ W.h.m}^{-2}$ ), apesar do predomínio de sol, é o dia 27/06/201, cuja cinética de inativação é apresentada na Figura 35.

A temperatura do lodo, apesar de ter sido superior à do dia 12/06, não passou de  $47^\circ\text{C}$ . Observa-se que após os 280 minutos de tratamento, quando o lodo atingiu  $38^\circ\text{C}$ , houve uma queda na concentração de *E. coli*, porém em taxas lentas. Ao final das oito horas de experimento a concentração medida experimentalmente era de  $1 \times 10^3$  NMP/ml, e o valor encontrado numericamente pelo modelo foi de  $5,14 \times 10^1$  NMP/ml. A divergência entre os valores era esperada, principalmente em temperaturas baixas.

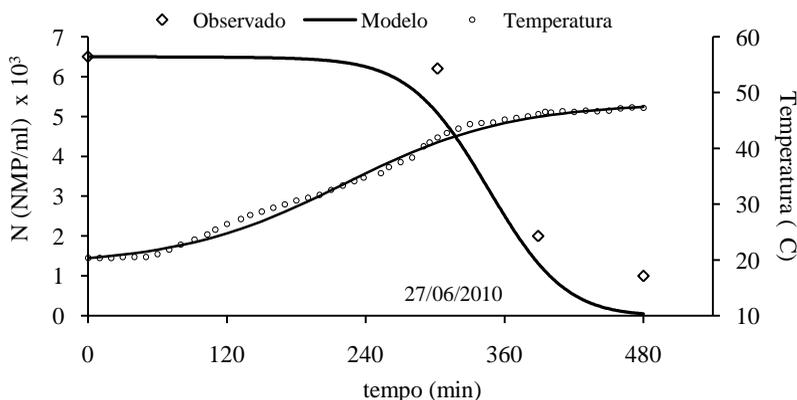


Figura 35: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 27/jun.

O comportamento do reator em dias com o céu encoberto do verão e início do outono não difere muito do observado nas Figuras 34 e

35. A grande quantidade de nuvens pode reduzir a zero a incidência de radiação direta, restando apenas as componentes difusas, que são menos energéticas e muitas vezes não incidem no melhor ângulo de absorção do coletor solar.

A Figura 36 trata do ensaio realizado em 16/jan, onde a irradiação solar média do período foi de  $374 \text{ W.h.m}^{-2}$ , como conseqüência, a temperatura máxima obtida foi de  $39^\circ\text{C}$ . A tendência do decaimento obtido no modelo foi a mesma dos dados experimentais. Após 480 min a concentração microbiana medida foi de  $9 \times 10^2 \text{ NMP/ml}$  e numericamente de  $1,4 \times 10^3 \text{ NMP/ml}$ .

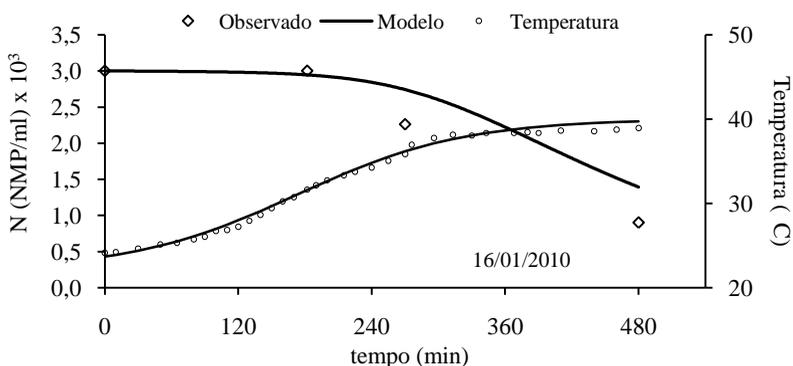


Figura 36: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 16/jan.

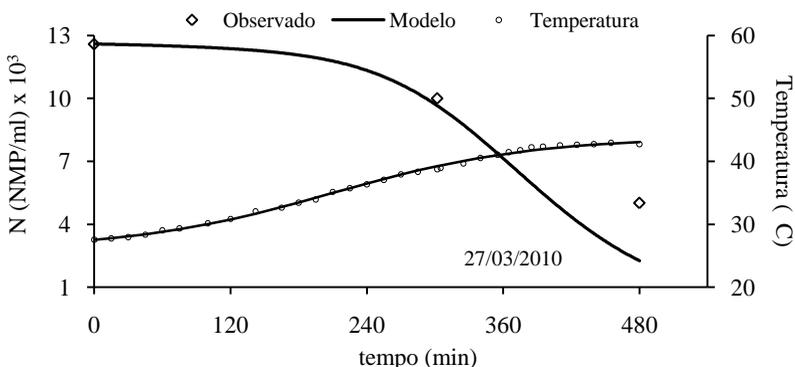


Figura 37: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para o ensaio realizado dia 27/mar.

No ensaio realizado em 27/03/2010 (Figura 37), cuja irradiação foi de  $356 \text{ W.h.m}^{-2}$ , a temperatura atingiu  $40^{\circ}\text{C}$  em aproximadamente 340 min, e ao final do experimento chegou em apenas  $43^{\circ}\text{C}$ .

A tendência do decaimento microbiano do modelo mostrou-se fiel aos dados experimentais, também nessa condição. A concentração microbiana medida ao final do experimento foi de  $5,01 \times 10^3 \text{ NMP/ml}$  e  $2,25 \times 10^3 \text{ NMP/ml}$  pelo modelo numérico.

Conforme a Tabela 07, em  $45^{\circ}\text{C}$  o valor de  $D_T$  é extremamente alto (142,68 min), podendo inviabilizar o processo de desinfecção, pois o produto gerado pode não estar apto a atender as exigências da legislação, mesmo com longos períodos de aquecimento.

#### 5.4.1 Avaliação do Modelo

Para verificar a adequação do modelo proposto para inativação térmica da *E. coli* no reator, os dados experimentais foram confrontados com os valores gerados numericamente pelo modelo. O coeficiente angular e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram determinados por regressão linear. Algebricamente, esses coeficientes são iguais a 1 (um) quando os resultados experimentais forem exatamente iguais aos do modelo.

Nas Figuras 38 e 39 constam os gráficos obtidos a partir dos ensaios discutidos anteriormente. Observa-se que os valores dos coeficientes angulares e de determinação apresentam certos desvios, mas ambos se aproximam de 1 (um). A Tabela 13 traz esses coeficientes, além da porcentagem de variância (%V) encontrada pela Equação (13), para todos os ensaios realizados desde dez/2009 a jul/2010.

O número de pontos experimentais coletados poderia ter sido maior, assim seria mais fácil acompanhar a tendência das curvas do modelo, mas isso não foi possível devido ao custo das análises. No entanto, ao todo foram realizados 20 ensaios, e em todos eles o comportamento do modelo foi razoável na predição da concentração microbiana, mostrando-se robusto e respondendo bem às mudanças nas condições de temperatura, o que é mais um indicativo de sua validade.

Outro aspecto a ser considerado é a escala do reator, que pode ser considerada real, visto que os ensaios foram realizados com 200 litros de lodo por batelada e o processo destina-se a tratamentos descentralizados. Numa escala com essa dimensão pequenos desvios podem ser potencializados.

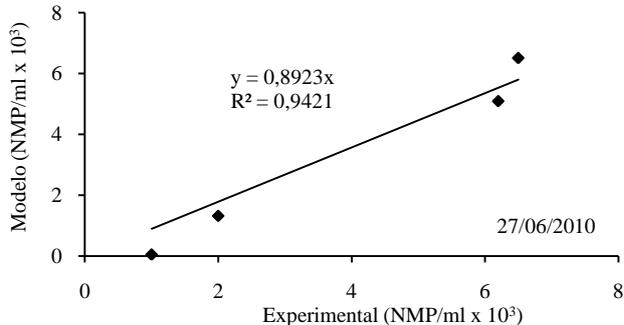
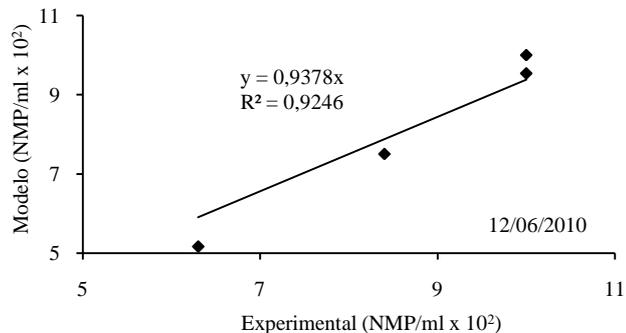
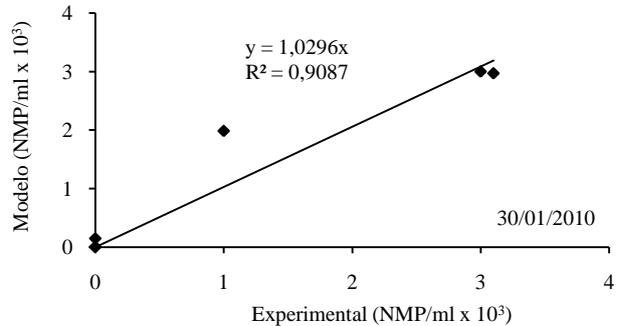
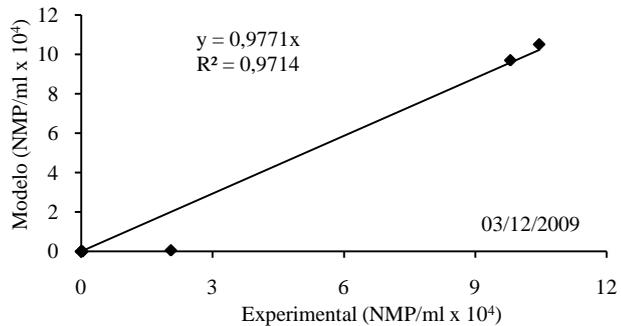


Figura 38: Valores observados experimentalmente *versus* valores obtidos pelo modelo na inativação de *E. coli* para ensaios realizados em 03/dez; 30/jan; 12/jun e 27/jun (céu aberto).

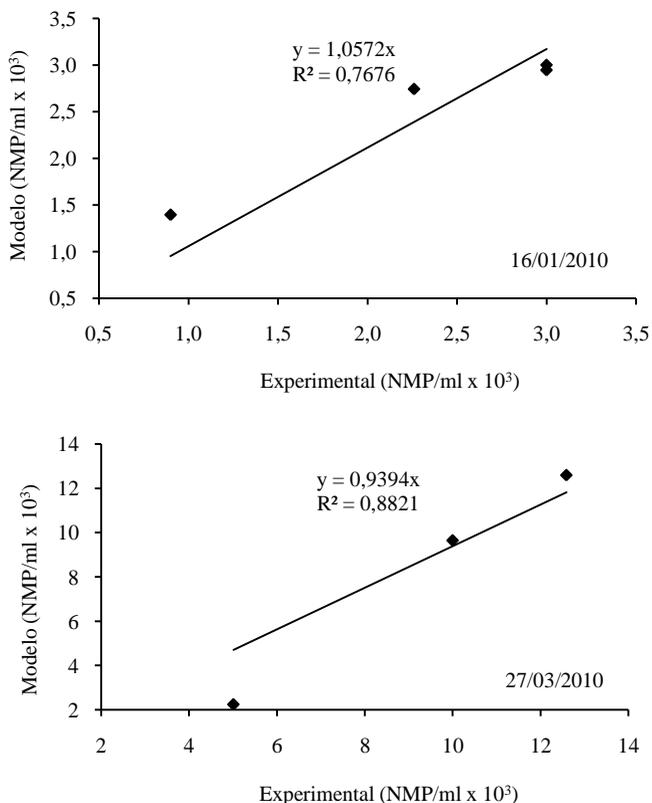


Figura 39: Valores observados experimentalmente *versus* valores obtidos pelo modelo na inativação de *E. coli* para ensaios realizados em 16/jan e 27/mar (céu encoberto).

Além da escala, devem ser consideradas também as condições experimentais de campo que diferem das condições de laboratório em experimentos de bancada, onde a maioria dos fatores externos podem ser controlados, minimizando erros.

Apesar disso, observa-se na Tabela 13 que o modelo foi satisfatório. Os coeficientes angulares ficaram entre 0,802 e 1,165 e os coeficientes de determinação entre 0,768 e 0,971. A porcentagem de variância que é calculada levando em consideração o valor de  $R^2$ , e o número de observações, também foi satisfatória. Dos vinte ensaios realizados, apenas quatro deles ficaram com a %V inferior a 80%, sendo um deles inferior a 76%.

Tabela 13: Avaliação de modelo de inativação térmica para *E. coli*. Valores do coeficiente angular, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de variância (%V) para os resultados do modelo *versus* dados experimentais em cada ensaio.

Data	Condição do céu	Radiação solar	Coef. angular	$R^2$	%V
03/12/09	aberto	> 700	0,977	0,971	96,4
07/12/09	aberto	> 700	1,109	0,909	88,6
20/12/09	aberto	> 700	0,802	0,879	84,8
06/02/10	aberto	> 700	1,015	0,950	93,8
20/02/10	aberto	> 700	1,130	0,891	86,3
30/01/10	aberto	500 a 700	1,030	0,909	88,6
13/03/10	aberto	500 a 700	1,157	0,827	76,9
17/04/10	aberto	500 a 700	0,825	0,898	86,4
01/05/10	aberto	500 a 700	0,977	0,965	95,7
16/01/10	encoberto	< 500	1,057	0,768	65,1
23/01/10	encoberto	< 500	1,054	0,967	93,5
27/03/10	encoberto	< 500	0,939	0,882	76,4
11/04/10	encoberto	< 500	1,097	0,883	76,6
09/05/10	aberto	< 500	0,879	0,949	93,2
05/06/10	aberto	< 500	0,849	0,882	82,3
12/06/10	aberto	< 500	0,938	0,925	88,7
27/06/10	aberto	< 500	0,892	0,942	91,3
03/07/10	aberto	< 500	0,853	0,941	92,1
25/07/10	aberto	< 500	1,165	0,911	86,7
31/07/10	aberto	< 500	0,875	0,960	94,6

Cerf, Davey, Sadoudi (1996) em estudo sobre os efeitos de fatores ambientais sobre a destruição de *E. coli*, apresentaram modelos empíricos através de regressão múltipla para inativação em função da temperatura, pH e atividade de água. O modelo em condições não isotérmica explicou 80,7% da variância.

Há uma tendência para o modelo se comportar melhor em níveis de irradiação solar média acima de 500 W.h.m<sup>-2</sup>, onde a temperatura é mais alta, o que era esperado em virtude de que os parâmetros cinéticos utilizados foram encontrados em temperaturas acima de 45°C.

Outro fator a ser considerado na estimativa dos parâmetros cinéticos, é o número de ciclos logarítmico reduzidos em 45°C e 50°C

(Figura 15), que foi relativamente baixo, podendo gerar mais desvios na aproximação dos valores preditos com os dados experimentais nessa faixa de temperatura.

Contudo, estatisticamente os coeficientes da Tabela 13 não apresentaram diferenças significativas, ao nível de significância de 5%, pelo teste Tukey, o que é um bom indicativo de que o modelo de predição responde da mesma forma em todas as faixas de irradiação solar, e conseqüentemente, às alterações de temperatura.

## 6 CONCLUSÕES

Através dos experimentos de inativação térmica da *E. coli* em condições de temperatura constante foi possível avaliar a resistência desse microrganismo em lodo de esgoto, o qual demonstrou seguir uma cinética de primeira ordem. Os principais parâmetros obtidos foram  $D_{50^{\circ}\text{C}} = 25,93$  min;  $D_{55^{\circ}\text{C}} = 3,61$  min;  $D_{60^{\circ}\text{C}} = 1,41$  min;  $z = 8,3^{\circ}\text{C}$  e  $E_d = 2,48 \times 10^5$  J.mol<sup>-1</sup>. Esses dados podem contribuir para avaliação e estudos de processos de desinfecção de lodo de esgoto, visto que são escassos na literatura parâmetros referentes à destruição térmica microbiana em efluentes domésticos.

O reator com aquecimento solar proposto neste estudo apresentou grande potencial na redução da carga microbiana do lodo de esgoto, podendo ter aplicabilidade na higienização desses efluentes e principalmente na complementação de outros tratamentos de estabilização, elevando a qualidade e segurança do produto final para utilização na agricultura.

Nas condições climáticas de Florianópolis, os ensaios que tiveram um desempenho considerável foram aqueles realizados em dias com céu aberto entre 03/dezembro e 01/maio, cuja irradiação solar média do período foi superior a 500 W.h.m<sup>-2</sup>. Nesses ensaios a temperatura média do lodo ficou acima de 53°C por pelo menos três horas, atingindo 73°C em alguns casos. Em seis de nove ensaios realizados nessa condição, a temperatura ficou acima de 60°C por mais de duas horas. A redução de *E. coli* foi considerável, ficando entre 4,2 e 7,1 unidades logarítmicas. Para coliformes totais a redução ficou entre 4,8 e 7,4 unidades logarítmicas. Desses ensaios apenas um apresentou recrescimento de *E. coli* após 24 horas do tratamento.

Os ensaios realizados entre 09/maio e 31/julho, além daqueles realizados em dias com o céu encoberto, tiveram seu desempenho comprometido pelas baixas temperaturas do lodo. A redução microbiana nessas condições ficou entre 0,2 e 2,27 unidades logarítmicas para *E. coli*; e entre 0,55 e 3,5 unidades logarítmicas para coliformes totais. Sendo que a eficiência do reator nesses casos foi significativamente inferior aos demais, confirmado pelo teste Tukey ao nível de confiança de 95%.

O modelo diferencial de primeira ordem foi satisfatório na predição da concentração de *E. coli* em condições não isotérmicas no reator com aquecimento solar. Os valores do coeficiente de

determinação dos gráficos de comparação do modelo vs. dados experimentais ficaram entre 0,768 - 0,971, e a porcentagem de variância ficou entre 65,1% – 96,4%, sendo que em apenas quatro dos vinte ensaios esteve abaixo de 80%. A inativação completa da *E. coli* no reator ocorreu entre 4 e 6 horas após início do tratamento para os ensaios com irradiação solar média acima de 500 W.h.m<sup>2</sup>.

Ressalta-se que os resultados referentes à eficiência do reator são válidos apenas para a localidade em questão ou demais situações com condições climáticas semelhantes. Regiões como Nordeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil, ou mesmo outros países de clima quente, onde os índices de irradiação solar são superiores e as variabilidades mensais são menores, possuem maior potencial de utilização desse processo, o que pode representar mais uma alternativa na melhoria das condições de saneamento e no desenvolvimento dessas regiões.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Além dos aspectos abordados nesse trabalho, restam outros que poderiam fornecer mais elementos sobre o comportamento do processo. Estudos baseados na transferência de calor, envolvendo balanços de energia no sistema, poderiam ser úteis na simulação do tratamento em diversas condições de radiação solar. O detalhamento do perfil de temperatura desenvolvido no interior do reator, também poderia ser explorado através de modelagem matemática por fluidodinâmica computacional.

Esses estudos associados ao conhecimento da cinética de inativação térmica dos microrganismos indicadores poderiam auxiliar na busca por melhores condições de operação e na estimativa da eficiência do reator nas mais variadas condições.

A avaliação de outros agentes microbiológicos como vírus, *Salmonella* e helmintos, poderia fornecer mais dados para validação do processo de desinfecção em questão.

Observou-se que são escassos trabalhos publicados envolvendo a determinação de parâmetros cinéticos de inativação térmica de microrganismos em lodos de esgotos, os quais são essenciais na avaliação de processos de higienização por aquecimento.

O estudo do reator com aquecimento solar em tempos de detenção hidráulica superiores às 8 horas estabelecidas, associados ao estudo de fenômenos biológicos (ex. digestão matéria orgânica) concomitantes ao processo térmico também poderiam contribuir na exploração de mais benefícios do processo. Assim como o estudo de agitadores apropriados e de outros processos consorciados a esse que poderiam contribuir na qualidade do produto final (ex. leitos de secagem, filtros com macrófitas, compostagem, digestão anaeróbia).

Com relação aos aspectos econômicos, seria interessante a comparação dos custos de implantação e operação desse sistema com outros processos de desinfecção de efluentes domésticos, a fim de verificar sua atratividade.

## 8 REFERÊNCIAS

AITKEN, M. D.; SOBSEY, M. D.; BLAUTH, K. E.; SHEHEE M.; CRUNK, P. L. and WALTERS, G. W. Inactivation of *Ascaris suum* and Poliovirus in biosolids under thermophilic anaerobic digestion conditions. **Environ. Sci. Technol.**, v. 39, p. 5804-5809, jun./2005.

ALTERTHUM, F.; CARVALHAL, M. L. Controle de microrganismos. In: TRABULSI, L. R. *et al.*. **Microbiologia**. 3. ed. São Paulo: Editora Atheneu, 1999.

AL-HOLY, M.; QUINDE, Z.; GUAN, D.; TANG, J.; RASCO, B.. Thermal inactivation of *Listeria innocua* in Salmon (*Oncorhynchus keta*) Caviar using conventional glass and novel aluminum thermal-death-time tubes. **Journal of Food Protection**, v.67, n.2, 2004, p. 383–386.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th. Washington: APHA-AWWA-WEF, 1998. 1195 p.

ANDREOLI, C. V. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 97 p.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biosólidos: transformando problemas em soluções**. 2. ed. Curitiba: Sanepar, Finep, 2001.

ANDREOLI, C. V.; POMPEO, R. P.. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. (org.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. PROSAB 5, 2009. 383 p.

ARIAS, E. S.; PETERSON, D.. **Colectores solares**. Cartago: Tecnologica de Costa Rica, 1985. 144p.

ARRUDA, L.B. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos**. 2004. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARTHURSON, V. Proper sanitization of sewage sludge: a critical issue for a sustainable society. **Applied and Environmental Microbiology**, v.74, n.17, sept. 2008, p.5267–5275.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7229**: Projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementares e disposição final dos efluentes de tanques sépticos: procedimentos. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio de calibração. Rio de Janeiro, 2005.

AUGUSTO, P. E. D.. **Modelamento matemático da transferência de calor durante o tratamento térmico de alimentos líquidos embalados**. 2009. 2530 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

AUGUSTO, P. E. D.; TRIBST, A. A. L.; CRISTIANINI, M.. Thermal inactivation of *Lactobacillus plantarum* in a model liquid food. **Journal of Food Process Engineering**. Article first published online: 2 sep 2009.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; NASCIMENTO, L. E.; CARVALHO, G. R.M.; SILVA C. V. Coliformes como indicadores da qualidade da água: alcance e limitações. In: **Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 27, 2000, Porto Alegre. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo: ABES, 2000.

BARROS, I. T.; COSTA, A. C. S. da; ANDREOLI C. V. Avaliação da reciclagem agrícola de lodo de esgoto higienizado na produção da cultura de milho (*Zea mays*, L.). In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 24, 2007, Belo Horizonte. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo: ABES, 2007.

BELLI FILHO, P.; SOARES, H. M.; MATIAS, W. G.; PINTO, R. de O.; CHAGAS, A.; CASTILHO Jr., A. B. **Digestão anaeróbia de resíduos orgânicos e de lodo de tanque séptico**. 2007. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/tanque.pdf>>. Acesso em 18 de fevereiro de 2010.

BEZERRA, A. M.. **Aplicações térmicas da energia solar**. 2a ed. João Pessoa: Ed. Universitaria UFPB, 1986.

BONNET, B. R. P; LARA, A. I.; DOMASZAK, S. C. Indicadores biológicos de qualidade sanitária do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P (coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. SAPENAR/PROSAB. 1998 , p.11-26.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n° 375**. Brasília, 2006, 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2010.

CERF, 0.; DAVEY, K. R.; SADOUDI, A. K. Thermal inactivation of bactéria: a new predictive model for the combined effect of three environmental factors: temperature, pH and water activity. *Food Research International*, v. 29, n.3-4, 1996, p.219-226.

CHERNICHARO, C. A. L.. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: DESA - UFMG, 1997. V. 5: Reatores anaeróbios. 245p.

CHUNG, H.; WANG, SHAOJIN; TANG, JUMING. Influence of Heat Transfer with Tube Methods on Measured Thermal Inactivation Parameters for *Escherichia coli*. *Journal of Food Protection*, v.70, n.4, 2007, p. 851–859.

COLLE, S. (Org.); PEREIRA, E. B. (Org.). **Atlas de Radiação Solar do Brasil: 1ª versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície**. Brasília: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia e LABSOLAR/EMC/UFSC – Laboratório de Energia Solar, 1998. 65 p.

COMETTA, Emilio. **Energia solar: utilização e empregos praticos**. São Paulo: Hemus, c1982. 127p.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. Wiley, NY, 1991.

ECHER, E.; SOUZA, M. P.; SCHUCH, N. J.. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, p.276-283, set/2001.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1996. 182p.

FRÖHLICH, C.; LEAN, J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophysical Research Letters*, v. 25, n. 23, p.4377-4380, dec/1998.

FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE - FUNASA. **Programa de desenvolvimento científico e tecnológico**. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/internet/ProgDesenv.asp>. Acesso em: 24 de março, 2009.

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.12, 2008, p.116–140.

GABRIEL, A. A.; CRUZ, K. G.; GUZMAN, J. A. D.. Thermal death times of *Escherichia coli* in Young coconut endosperm beverage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.33, 2009, p.136–144.

GABRIEL, A. A.; NAKANO, H.. Inactivation of *Salmonella*, *E. coli* and *Listeria monocytogenes* in phosphate-buffered saline and apple juice by ultraviolet and heat treatments. **Food Control**, v.20, 2009, p.443–446.

GARG, H P. **Treatse on solar energy..** Chichester: J. Wiley, 1982.

HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering.** Boca Raton: Lewis, 1993.

HEINSS; U.; LARMIE; S. A.; STRAUSS, M. **Solids separation and pond systems for the treatment of faecal sludges in the tropics: lessons learnt and recommendations for preliminary design.** 2<sup>a</sup> ed. Duebendorf, EAWAG/SANDEC , 1999. 88p.

INGUNZA, M. del P. D.; ANDRADE NETO, C. O.; ARAÚJO, A. L. C.; SOUZA, M. A. A.; MEDEIROS, S. A.; BORGES, N. B.; HARTMANN, C. M. Caracterização física, química e biológica do lodo de fossas/tanques sépticos. In: ANDREOLI, C. V. (org.). **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final.** PROSAB 5, 2009. 383 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: síntese de indicadores 2008.** Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2008/sintese\\_pnad2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2008/sintese_pnad2008.pdf)>. Acesso em 17 de fevereiro, 2010.

JIN, T.; ZHANG, H.; BOYD, G.; TANG, J.. Thermal resistance of *Salmonella enteritidis* and *Escherichia coli* K12 in liquid egg determined by thermal-death-time disks. **Journal of Food Engineering**, v.84, 2008, p.608–614.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domesticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 683p.

JUNEJA, V. K.; MARMER, B. S. Lethality of heat to *Escherichia coli* O157:H7: D- and z-value determinations in turkey, lamb and pork. **Food Research International**, v.32, 1999, p.23-28.

KLINGEL, F. **Nam Dinh urban development project – septage management study**. Nam Dinh City: EAWAG/SANDEC , 2001. 78p.

KONÉ, D.; STRAUSS, M. Low-cost Options for Treating Faecal Sludges (FS) in Developing Countries – Challenges and Performance. In: **9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control and to the 6th International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilisation Ponds**. Avignon, France, 2004. 7p.

KOOTTATEP, T.; POLPRASERT; C.; OANH, N. T. K.; MONTANGERO, A.; STRAUSS, M. **Sludges from on-site sanitation systems: low-cost treatment alternatives**. 2007. Disponível em: <[http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/sandec/publikationen/publications\\_ewm/downloads\\_ewm/sludges\\_from\\_OSS\\_Koottatep.pdf](http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/sandec/publikationen/publications_ewm/downloads_ewm/sludges_from_OSS_Koottatep.pdf)>. Acesso em 30 de junho de 2009.

KOWAL, N. E. **Health effects of land applications of municipal sludge**. EPA/600/1-85/085. Cincinnati: Health effects Research Laboratory, 1985.

KREITH, Frank. **Principles of solar engineering..** New York: McGraw-Hill Book, 1978.

LANG, N. L.; SMITH, S. R. Time and temperature inactivation kinetics of enteric bacteria relevant to sewage sludge treatment processes for agricultural use. **Water Research**, v. 42, n. 8-9, p. 2229-2241, apr. 2008.

MENESES, C.G.R.; INGUNZA, M. del P. D.; FARIAS, N. M. N.; CÂMERA, A. C. J. Caracterização físico-química e biológica dos resíduos de sistemas tipo tanque séptico-sumidouro da cidade do Natal. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21, 2001, João Pessoa. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo: ABES, 2001.

METCALF & EDDY; TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 3rd.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334p.

MOCÉ-LLIVINA, L.; MUNIESA, M.; PIMENTA-VALE, H.; LUCENA, F.; JOFRE, J. Survival of Bacterial Indicator Species and Bacteriophages after Thermal Treatment of Sludge and Sewage. **Applied and Environmental Microbiology**, vol. 69, n. 3, p. 1452-1456, mar. 2003.

MOTULSKY, H. J.; CHRISTOPOULUS, A. **Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression**. A practical guide to curve fitting. Graphpad Software Inc., San Diego CA, 2003.

OLIVEIRA, S. H. F.. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: ênfase na eletricidade de residências de baixo consumo**. Dissertação (Mestre em Energia). Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OSAILI, T. M.; GRIFFIS, C. L.; MARTIN, E. M.; BEARD, B. L.; KEENER, A. E.; MARCY, J. A. Thermal Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* in Breaded Pork Patties. **Journal of Food Science**, v.72, n.2, 2007, p. 56-61.

OTEIZA, J. M.; GIANNUZZI, L.; CALIFANO, A. N.. Thermal inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Escherichia coli* isolated from morcilla as affected by composition of the product. **Food Research International**, v.36, 2003, p.703–712.

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R.; GONÇALVES, R. F.. Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: **Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, XXVIII**. Cancun, México: AIDS, 2002. 6p.

PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Desinfecção de efluentes com tratamento terciário utilizando energia solar (SODIS): avaliação do uso do dispositivo para concentração dos raios solares. **Eng. Sanitária e Ambiental**, vol.10, n. 1, p. 9-13, jan-mar. 2005.

PECSON, B. M.; BARRIOS, J. A.; JIMÉNEZ, B. E.; NELSON, K. L. The effects of temperature, pH, and ammonia concentration on the inactivation of *Ascaris* eggs in sewage sludge. **Water Research**, v. 41, p.2893 – 2902, may 2007.

PFLUG, I. J.; HOLCOMB, R. G.; GÓMEZ, M. M. Principles of the thermal destruction of microorganisms. In: BLOCK, Seymour Stanton. **Disinfection, sterilization and preservation**. 5th. Ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, c2001. 1481p.

PHILIPPI, L. S. **Estude experimentale de dispositifs d'assainissement autome: applications em conditions reeles**. 1992. 634f. Tese (Doutorado) – Unites de formation et de recherche pharmaceutiques. L'Universite de Montpellier I, France.

RATKOWSKY, D. A. **Handbook of nonlinear regression models**. New York: Marcel Dekker Inc., 1990. 241p.

REVERON, I. M.; BARREIRO, J. A.; SANDOVAL, A.J. Thermal resistance of *Saccharomyces cerevisiae* in Pilsen beer. **J. Inst. Brew.**, v.109, n.2, 2003, p.120–122.

REVERON, I. M.; BARREIRO, J. A.; SANDOVAL, A. J. Thermal death characteristics of *Lactobacillus paracasei* and *Aspergillus niger* in Pilsen beer. **Journal of Food Engineering**, v.66, 2005, p.239–243.

RÍSPOLI, Í. A. G.. **O aquecedor solar brasileiro: teoria e prática em prol de uma transferência de tecnologia sustentável**. 2008. 245 f. Tese (Doutor em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ROSA, D. J. M.. **Caracterização da radiação solar: o caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia**. Dissertação (Mestre em Energia). Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSE, J. B.; GRIMES, D. J. **Reevaluation of microbial water quality: Powerful new tools for detection and risk assessment**. American Academy of Microbiology, Washington, D.C. 2001.

SAWAI, J.; SAGAR, K.; HASHIMOTO, A.; IGARASHI, H.; SHIMIZU, M.. Inactivation characteristics shown by enzymes and bacteria treated with far-infrared radiative heating. **International Journal of Food Science and Technology**, v.38, 2003, p.661–667.

SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S. Tratamento de esgotos utilizando o potencial solo-planta. In: **Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria y Ambiental**, XXVI. CD Room. Anais ... Lima, Peru: AIDIS, 1998. 9p.

SILVA, S. M. C. P. *et al.* Principais contaminantes do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. p.69-121.

SILVA, M. O. S. A. da. **Análises físico-químicas para construção de estações de tratamento de esgotos**. São Paulo (SP): CETESB, 1977.

SIMONETI, M. F. **Inativação térmica de ovos de helmintos em água e em biossólidos digeridos: cinética em reator batelada e modelagem matemática em reator tubular**. 2006. 251 f. Tese (Doutor em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SPINKS, A. T.; DUNSTAN, R.H.; HARRISON, T.; COOMBES, P.; KUCZERA, G.. Thermal inactivation of water-borne pathogenic and indicator bacteria at sub-boiling temperatures. **Water Research**, v.40, 2006, p.1326–1332.

SPRENGER, R. L. **Aplicação do sistema fechado no aquecedor solar de água de baixo custo para reservatórios residenciais isolados termicamente**: concepção e comissionamento de um sistema-piloto de testes. 2007. 105 f. Dissertação (Mestre em Construção Civil). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

STUMBO, C. R. **Thermobacteriology in food processing**. 2. ed. New York: Academic Press, 1973. 329p.

SUNTTI, C. **Desaguamento de lodo de tanque séptico em filtros plantados com macrófitas**. 2010. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TOMEI, M. C.; BRAGUGLIA, C. M.; MININNI, G. Anaerobic degradation kinetics of particulate organic matter in untreated and sonicated sewage sludge: Role of the inoculums. **Bioresource Technology**, Roma, v. 99, n. 14, p. 6119–6126, jan/2008.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 8. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2005. 894p.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. do. **Meteorologia descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo (SP): Nobel, 1980, 374p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – U.S.EPA. **Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge**. EPA/625/R-92/013, Revised jul. 2003. U.S. Environmental Protection Agency: Washington, DC, 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r92013/625R92013.pdf>>. Acesso em: 20 fevereiro de 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - US.EPA. **Decentralized systems technology fact sheet – septage treatment/disposal**. Washington, D.C. EPA 832/F-99/068, 1999.

VELLIU; E.G.; VAN DERLINDEN, E.; CAPPUYNS, A. M.; NIKOLAIDOU, E.; GEERAERD, A. H.; DEVLIEGHERE, F.; VAN IMPE, J.F.. Towards the quantification of the effect of acid treatment on the heat

tolerance of *Escherichia coli* K12 at lethal temperatures. **Food Microbiology**, v.30, 2010, p.1-10.

VENGLOVSKY, J.; MARTINEZ, J.; PLACHA, I. Hygienic and ecological risks connected with utilization of animal manures and biosolids in agriculture. **Livestock Science**, 102, p.197–203, 2006.

VOGEL, A. I. **Análise Inorgânica Qualitativa**. 4. Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara, 1981. 690p.

YAGHMAEE, P.; DURANC, T.D.. Destruction and injury of *Escherichia coli* during microwave heating under vacuum. **Journal of Applied Microbiology**, v.98, 2005, p.498–506.

YUK, H.; GEVEKE, D. J.; ZHANG, H. Q.; JIN, T. Z.. Comparison of aluminum thermal-death-time disks with a pilot-scale pasteurizer on the thermal inactivation of *Escherichia coli* K12 in apple cider. **Food Control**, v.20, 2009, p.1053–1057.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Vol. 4: Excreta and greywater use in agriculture. Geneva: WHO. 2006. 182 p.

## APÊNDICES

APÊNDICE A: Sólidos totais, sólidos totais voláteis e pH do lodo de esgoto utilizado em cada ensaio.

Tabela A1: Sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV)<sup>4</sup>, e pH do lodo de esgoto utilizado em cada ensaio no reator com aquecimento solar

Ensaio	Data	ST (mg.L <sup>-1</sup> )	STV (mg.L <sup>-1</sup> )	STV ± DP (%) <sup>5</sup>	pH ± DP
1	3/dez	2138	1061	50,3 ± 2,9	6,83 ± 0,04
2	7/dez	3626	1633	45,0 ± 2,8	6,68 ± 0,11
3	20/dez	3281	1595	49,0 ± 1,0	7,17 ± 0,20
4	16/jan	5020	2526	50,1 ± 2,9	6,92 ± 0,02
5	23/jan	2100	981	46,7 ± 0,8	7,07 ± 0,04
6	30/jan	5752	2557	44,6 ± 1,6	7,42 ± 0,26
7	6/fev	4080	1743	42,6 ± 1,3	7,24 ± 0,08
8	20/fev	2073	983	47,3 ± 1,5	6,92 ± 0,05
9	13/mar	2067	879	42,2 ± 1,6	7,17 ± 0,07
10	27/mar	3837	1645	43,0 ± 2,5	7,09 ± 0,23
11	11/abr	5529	2273	40,9 ± 0,5	7,23 ± 0,13
12	17/abr	5320	2208	41,8 ± 6,7	7,00 ± 0,19
13	1/mai	4845	1885	39,1 ± 1,9	6,99 ± 0,23
14	9/mai	4235	1671	39,6 ± 1,3	7,28 ± 0,04
15	5/jun	5475	2649	48,4 ± 1,3	7,33 ± 0,10
16	12/jun	4168	1619	38,9 ± 3,5	7,62 ± 0,01
17	27/jun	2607	1112	43,4 ± 1,8	7,07 ± 0,25
18	3/jul	9819	4930	50,3 ± 1,0	7,39 ± 0,30
19	25/jul	7384	3726	50,4 ± 1,5	7,13 ± 0,25
20	31/jul	5947	3034	51,1 ± 1,2	6,95 ± 0,35
Média		4465	2035	45,2	7,12
Desvio Padrão		1961	1013	4,2	0,22

<sup>4</sup> Os valores de ST e STV correspondem à média das amostras de lodo coletado no início e final de cada ensaio.

<sup>5</sup> Teor de sólidos totais voláteis ± desvio padrão (DP) referente às amostras coletadas no início e final de cada tratamento.

APÊNDICE B: Dados de irradiação solar para o dia de cada ensaio no reator<sup>6</sup>.

Na Figura B1 observa-se que a irradiação solar disponível nos ensaios realizados em dez/2009 e fev/2010 atingiram níveis elevados e sofreu pouca influência de nuvens, o que é ideal para sistemas de aquecimento com energia solar. Já o mês de janeiro de 2010 foi marcado por dias com longos períodos de céu encoberto, o que ocasionou uma maior variabilidade nos dados de radiação solar. O ensaio realizado em 30/janeiro, apesar de ter sofrido influência de algumas nuvens, teve o predomínio de sol.

A partir de mar/2010, mesmo com o céu limpo, os índices de irradiação solar começam a diminuir devido à chegada do outono.

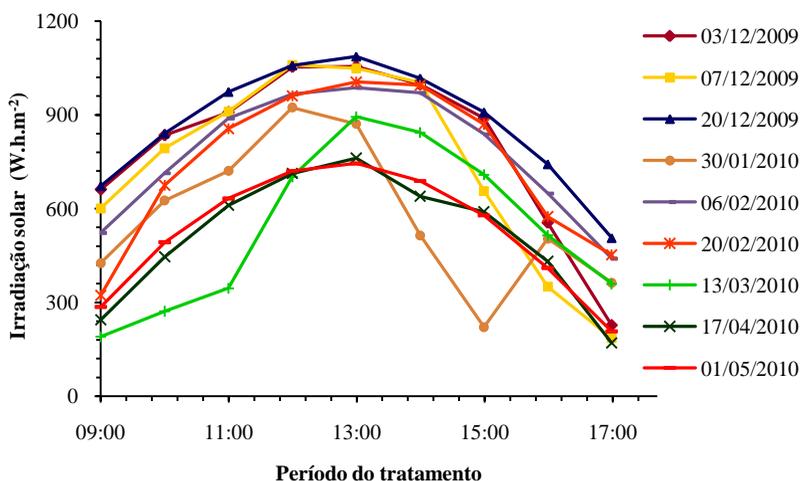


Figura B1: Curvas da irradiação solar global disponível durante os ensaios realizados com céu aberto no período de 03/dez/2009 a 01/mai/2010.

A Figura B2 mostra a irradiação solar nos ensaios realizados em condições de céu encoberto, sem aberturas de sol.

<sup>6</sup> Dados fornecidos pelo INMET e coletados na Estação automática de Florianópolis/São José-SC.

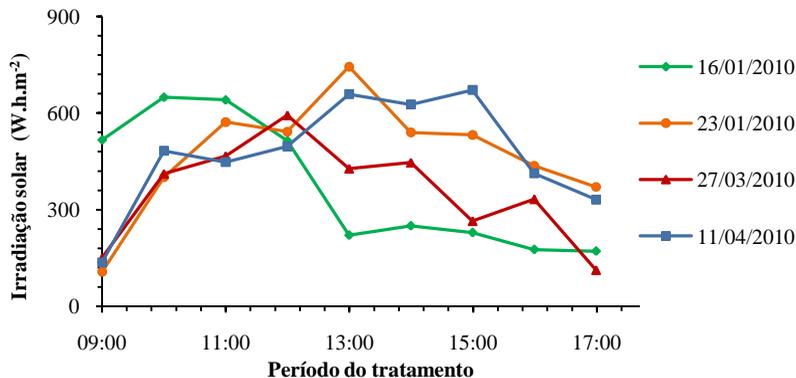


Figura B2: Curvas da irradiância solar global disponível durante os ensaios realizados com céu encoberto.

Os ensaios dos meses de maio, junho e julho foram realizados em condições de céu aberto (Figuras B3). Apenas no dia 12/jun houve uma maior influência de nuvens ao longo do dia, mas o predomínio foi de sol. Essa condição de sol entre nuvens (porém com predomínio de sol) deve ser considerada visto que ocorre frequentemente, e os sistemas térmicos com energia solar estão sujeitos a tais situações.

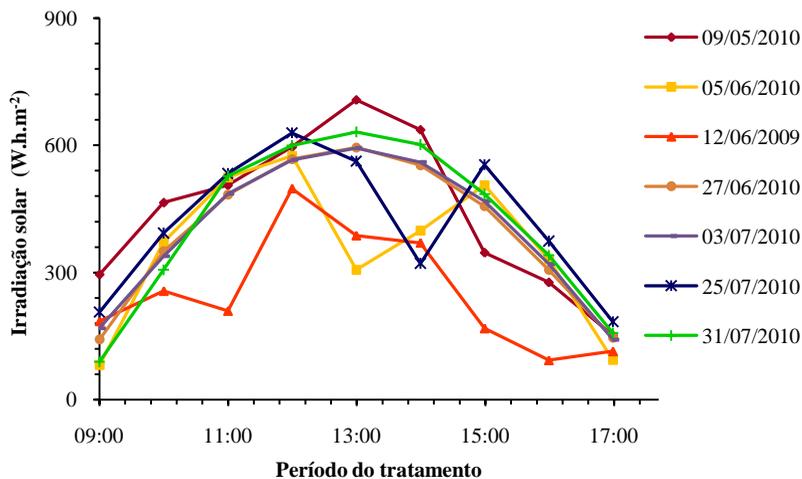


Figura B3: Curvas da irradiância solar global disponível durante os ensaios realizados com céu aberto no período de 09/mai a 31/jul/2010.

APÊNDICE C: Logaritmos das concentrações de *E. coli* e coliformes totais antes e após o tratamento térmico

Tabela C1: Logaritmo da concentração<sup>7</sup> de *E. coli* antes (Log N<sub>0</sub>) e imediatamente após (Log N<sub>f</sub>) o tratamento térmico; monitoramento do recrescimento após 24 horas (Log N<sub>r</sub>).

<i>Escherichia coli</i>					
Ensaio	Data	Log N <sub>0</sub>	Log N <sub>f</sub>	Log N <sub>r</sub>	- Log (N <sub>f</sub> / N <sub>0</sub> )
1	03/12/09	7,02	0,00	3,00	7,02
2	07/12/09	6,00	0,00	0,00	6,00
3	20/12/09	6,37	0,80	0,51	5,57
4	16/01/10	5,48	5,00	5,40	0,48
5	23/01/10	6,60	5,70	5,92	0,90
6	30/01/10	5,48	0,00	0,00	5,48
7	06/02/10	6,30	0,00	0,00	6,30
8	20/02/10	7,10	0,00	0,00	7,10
9	13/03/10	6,40	0,00	0,00	6,40
10	27/03/10	6,10	5,70	5,80	0,40
11	11/04/10	5,72	5,30	5,71	0,41
12	17/04/10	5,49	1,30	2,00	4,19
13	01/05/10	6,63	0,00	0,00	6,63
14	09/05/10	5,93	4,81	5,86	1,12
15	05/06/10	4,00	3,00	3,00	1,00
16	12/06/10	5,00	4,80	4,61	0,20
17	27/06/10	5,81	5,00	6,05	0,81
18	03/07/10	5,30	3,03	5,27	2,27
19	25/07/10	6,35	4,79	5,61	1,57
20	31/07/10	5,00	3,33	4,80	1,67

<sup>7</sup> Para amostras onde não foi detectada nenhuma célula de *E. coli*, assumiu-se N = 1 NMP/100ml, logo Log N = 0.

Tabela C2: Logaritmo da concentração<sup>8</sup> de coliformes totais antes (Log N<sub>o</sub>) e imediatamente após (Log N<sub>f</sub>) o tratamento térmico; monitoramento do recrescimento após 24 horas (Log N<sub>r</sub>).

<b>Coliformes totais</b>					
Ensaio	Data	Log N <sub>o</sub>	Log N <sub>f</sub>	Log N <sub>r</sub>	- Log (N <sub>f</sub> / N <sub>o</sub> )
1	03/12/09	7,4	1,6	3,0	5,8
2	07/12/09	6,3	1,5	1,8	4,8
3	20/12/09	6,7	1,0	1,3	5,7
4	16/01/10	5,9	4,8	5,7	1,1
5	23/01/10	6,8	5,7	6,2	1,1
6	30/01/10	5,5	0,0	0,0	5,5
7	06/02/10	6,8	0,0	0,0	6,8
8	20/02/10	7,4	0,0	0,0	7,4
9	13/03/10	6,9	0,0	0,0	6,9
10	27/03/10	6,8	6,3	6,3	0,5
11	11/04/10	6,0	5,4	5,7	0,6
12	17/04/10	6,3	1,5	2,5	4,8
13	01/05/10	7,3	1,0	2,9	6,3
14	09/05/10	6,8	5,1	6,4	1,7
15	05/06/10	7,1	5,8	6,3	1,3
16	12/06/10	5,5	4,9	5,6	0,6
17	27/06/10	6,6	5,9	6,0	0,7
18	03/07/10	6,8	3,4	5,0	3,4
19	25/07/10	7,2	5,1	5,9	2,1
20	31/07/10	7,0	3,5	6,8	3,5

<sup>8</sup> Para amostras onde não foi detectada nenhuma célula de coliformes totais, assumiu-se N = 1 NMP/100ml, logo Log N = 0.

APÊNDICE D – Predição da inativação térmica da *E. coli* dos ensaios não apresentados no item 5.4 dos resultados.

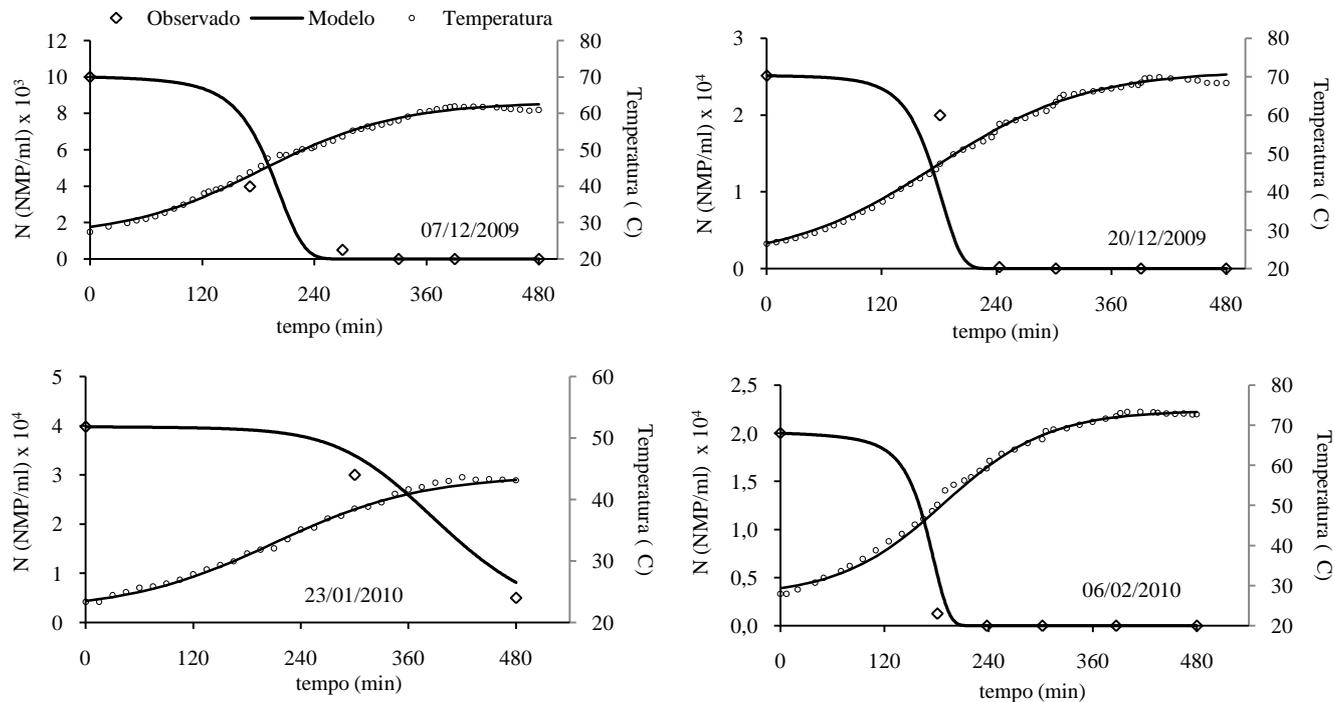


Figura B1: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para os ensaios realizados dias 07/dez; 20/dez; 23/jan; e 06/fev.

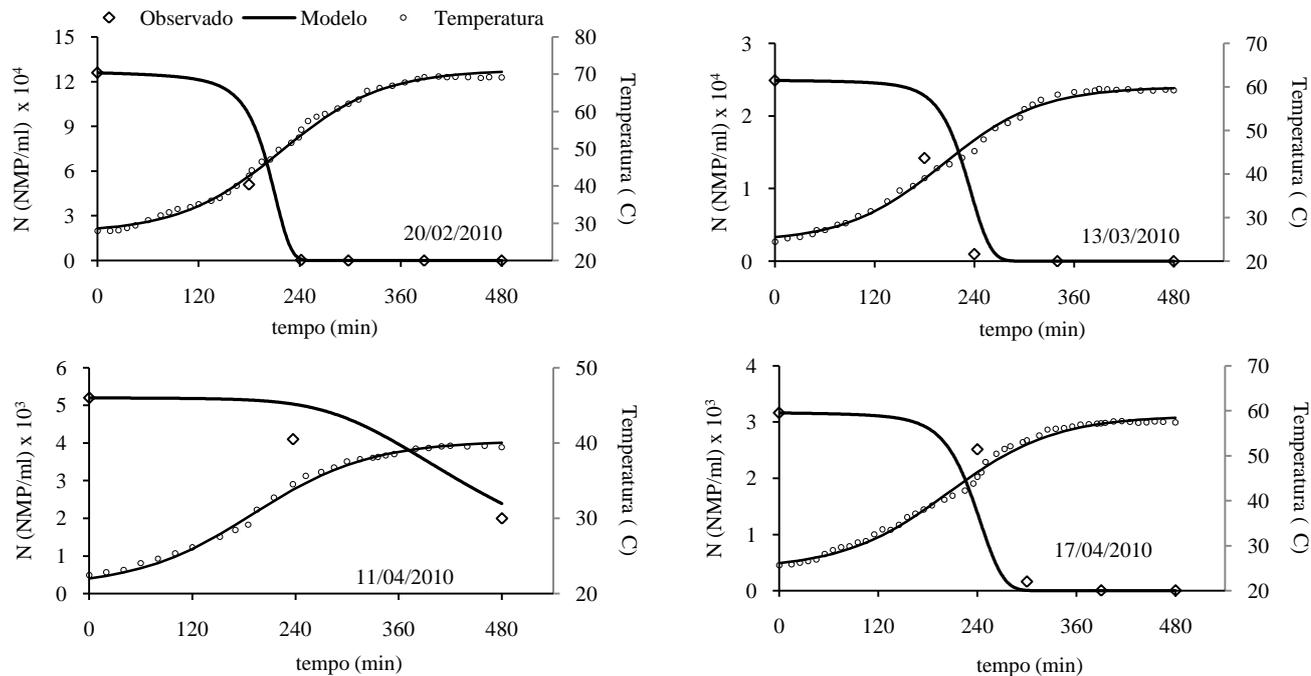


Figura B2: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para os ensaios realizados dias 20/fev; 23/mar; 11/abr; e 17/abr.

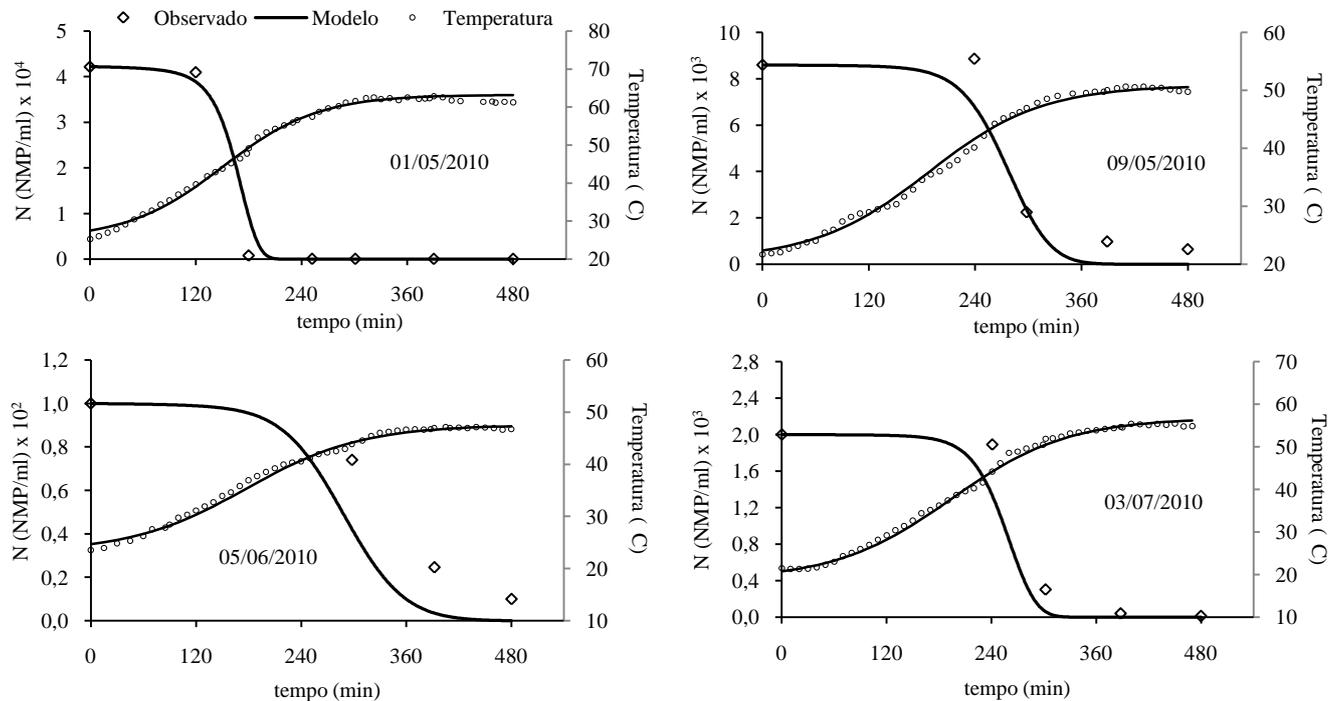


Figura B3: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para os ensaios realizados dias 01/mai; 09/mai; 05/jun; e 03/jul.

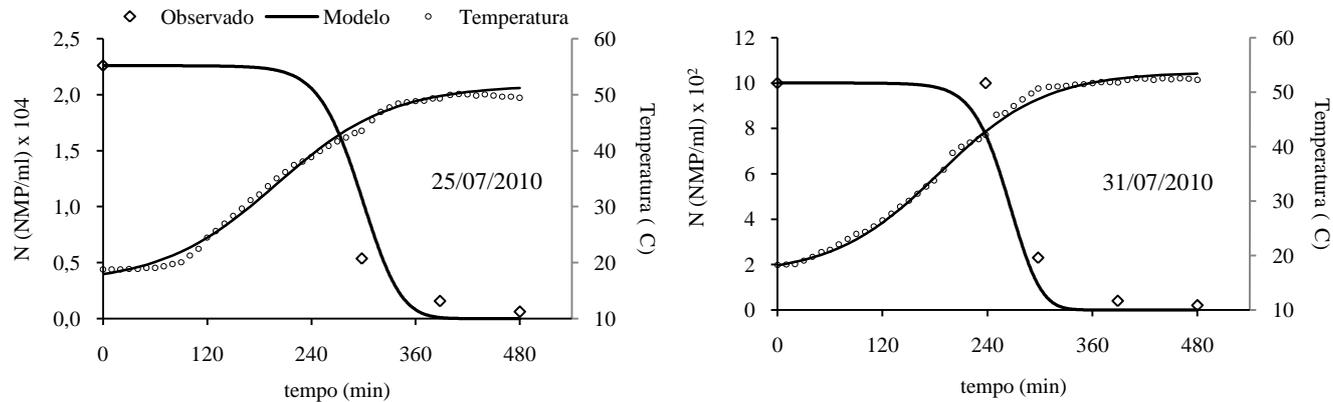


Figura B4: Curva de inativação térmica da *E. coli* obtida através do modelo de primeira ordem, dados observados experimentalmente e temperatura do lodo para os ensaios realizados dias 25/jul e 31/jul.

#### APÊNDICE E – Temperaturas do lodo ( $T_{\min}$ , $T_{\text{sup}}$ , $T_{\text{meio}}$ e $T_{\text{médio}}$ ) obtidas em cada ensaio.

Conforme é observado nas Figuras D1 a D5, as diferenças entre as leituras de  $T_{\text{sup}}$  e  $T_{\text{meio}}$  foram pequenas na maioria dos ensaios. Esses pontos abrangem a maior fração de lodo no reator. Gradientes maiores são observados com relação ao  $T_{\min}$ , correspondente às zonas mortas nas bordas da base, que atingem uma pequena fração da solução.

Os picos observados nas curvas de  $T_{\min}$  correspondem ao momento de coleta de lodo, onde a massa era homogeneizada manualmente. Por alguns minutos essa temperatura se eleva, no entanto o pico decresce rapidamente após a agitação cessar, o que é normal devido a menor intensidade das correntes de convecção natural.

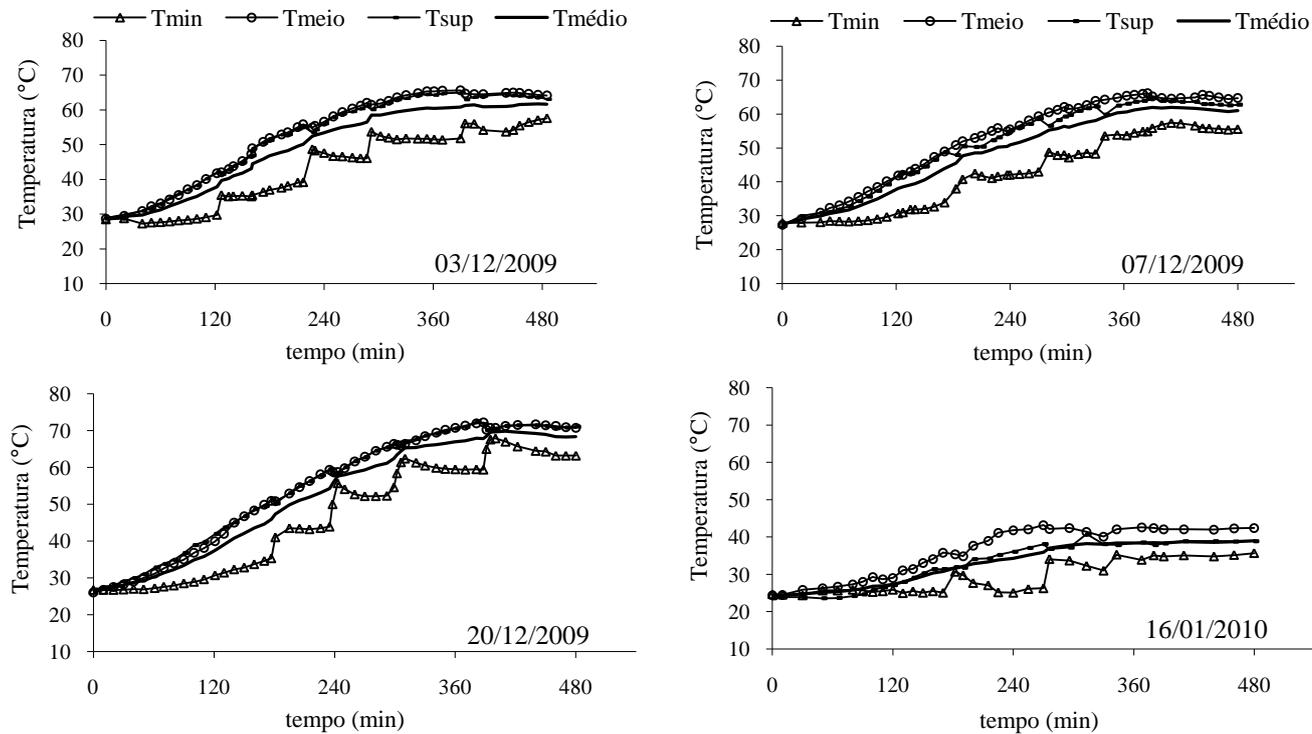


Figura D1: Temperaturas  $T_{min}$ ,  $T_{meio}$ ,  $T_{sup}$  e  $T_{médio}$  do lodo referente aos ensaios realizados em 03; 07 e 20/dez/09; e 16/jan/10.

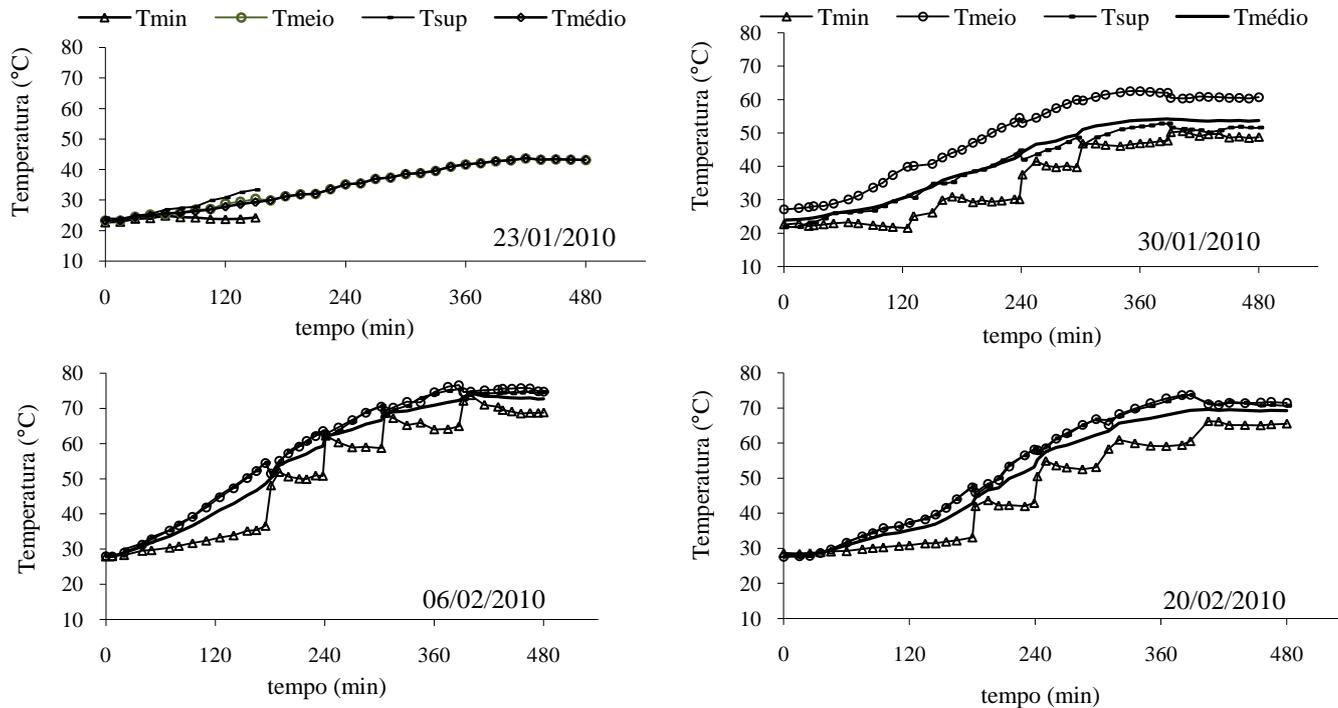


Figura D2: Temperaturas  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{meio}}$ ,  $T_{\text{sup}}$  e  $T_{\text{médio}}$  do lodo referente aos ensaios realizados em 23 e 30/jan; 06 e 20/fev/10. No ensaio do dia 23/01 o termômetro digital apresentou problemas, sendo possível a leitura apenas do  $T_{\text{meio}}$ .

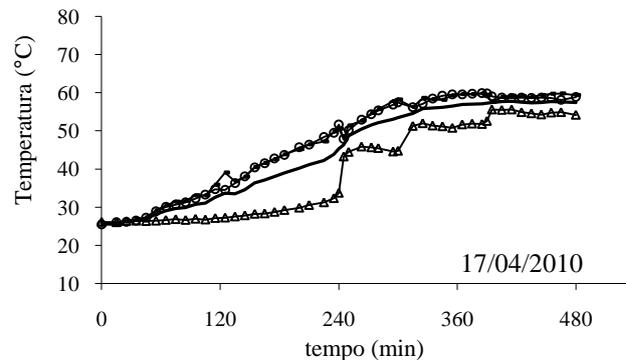
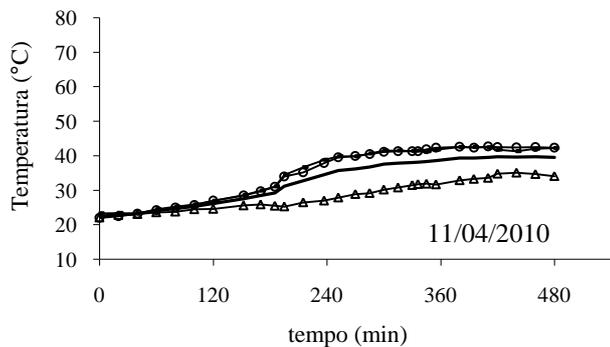
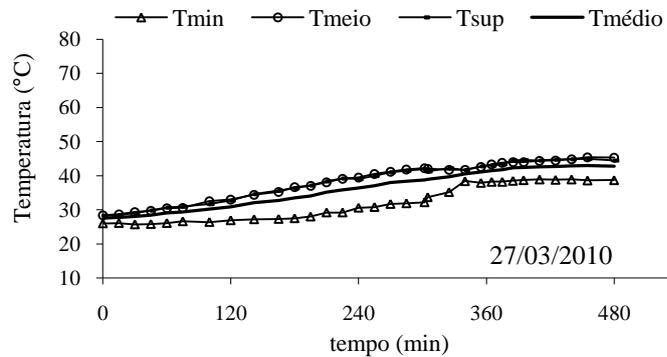
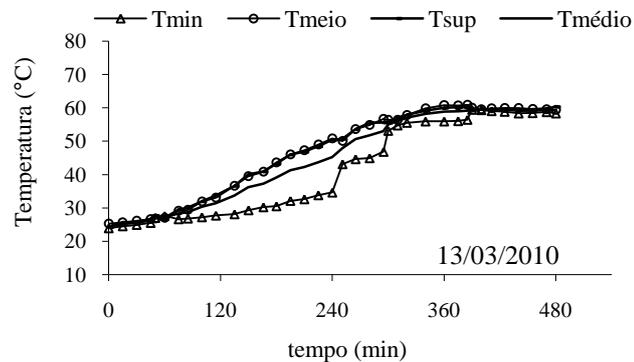


Figura D3: Temperaturas  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{meio}}$ ,  $T_{\text{sup}}$  e  $T_{\text{médio}}$  do lodo referente aos ensaios realizados em 13 e 23/mar; 11 e 17/abr/10.

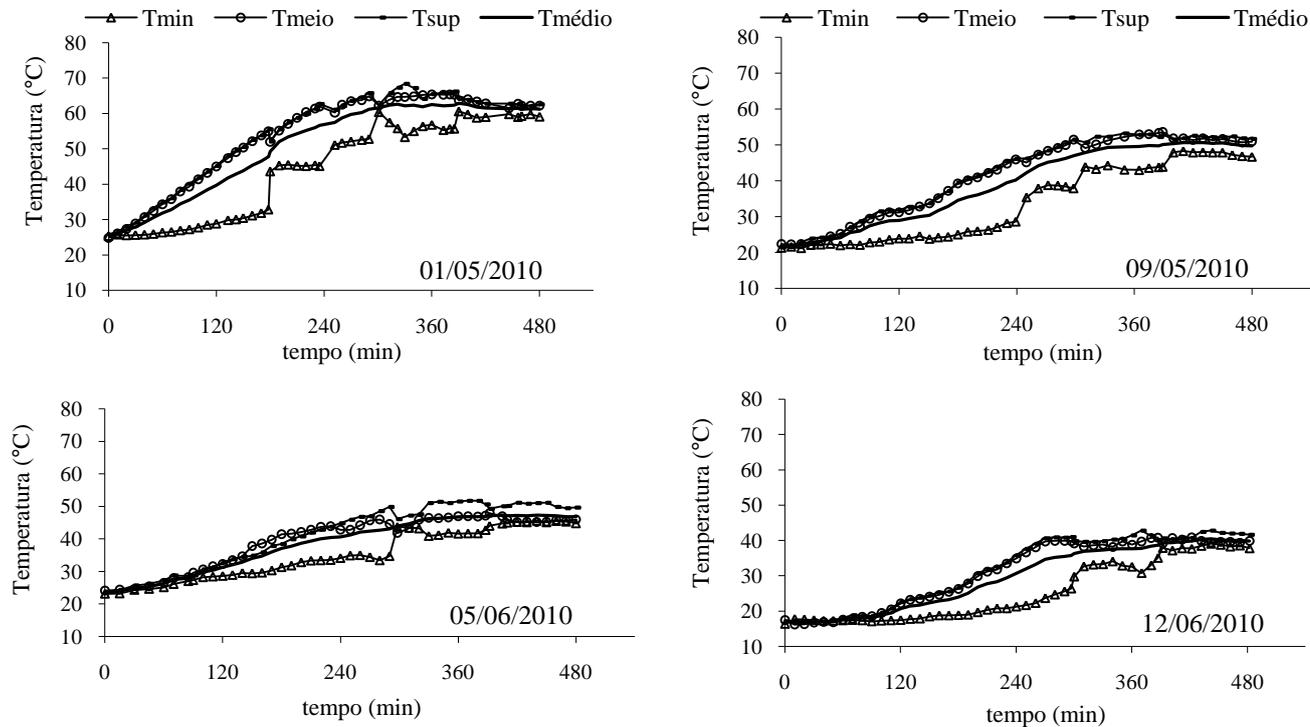


Figura D4: Temperaturas  $T_{min}$ ,  $T_{meio}$ ,  $T_{sup}$  e  $T_{médio}$  do lodo referente aos ensaios realizados em 01 e 09/mai; 05 e 12/jun/10.

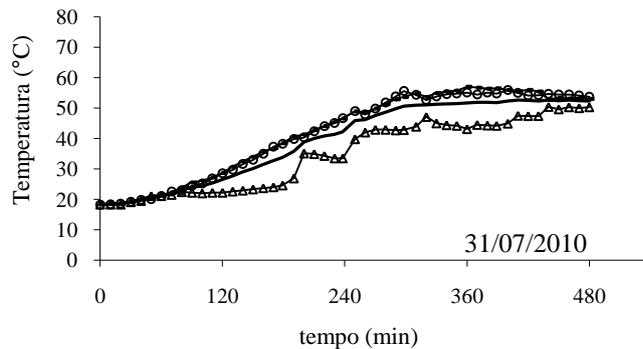
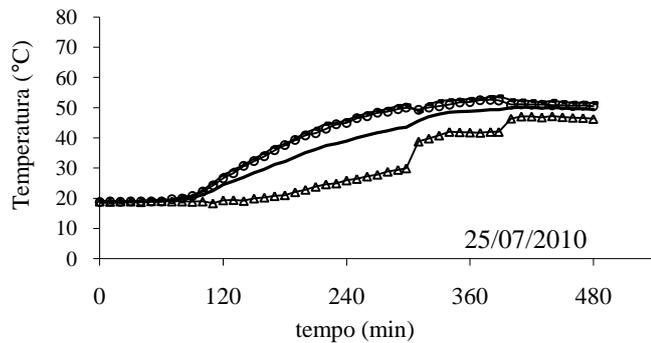
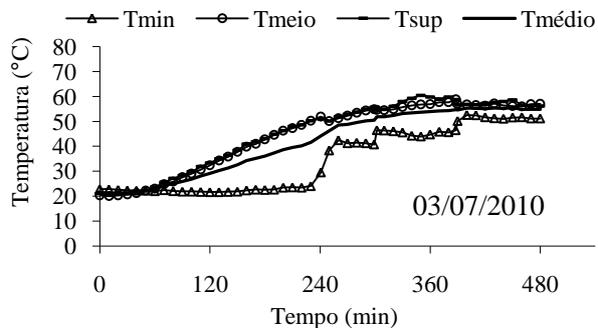
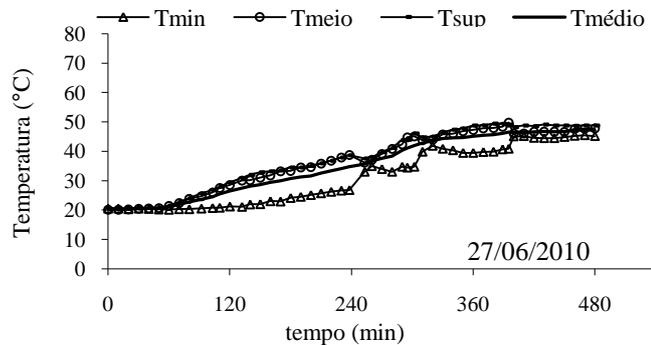


Figura D5: Temperaturas  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{meio}}$ ,  $T_{\text{sup}}$  e  $T_{\text{médio}}$  do lodo referente aos ensaios realizados em 27/jun; 03; 25 e 31/jul/10.

APÊNDICE F – Estimativa do número de pessoas que poderiam ser atendidas pelo sistema de desinfecção de lodo com energia solar.

Através de dados de geração de lodo pode-se estimar o número de pessoas que o sistema de desinfecção de lodo com energia solar poderia atender. A estimativa de geração de lodo fresco apresentada na NBR 7229 (ABNT, 1993), que trata da construção e operação de tanques sépticos, é de  $1 \text{ L.dia}^{-1}$  por pessoa. A taxa de acumulação total de lodo no tanque é função do volume de lodo digerido e em digestão, das faixas de temperatura ambiente e do intervalo entre as limpezas. Para um intervalo de limpeza de três anos e operação em temperatura ambiente entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$ , a taxa de geração de lodo é 145 dias.

Com esses dados pode-se analisar uma condição hipotética para estimar o número de pessoas que o reator com aquecimento solar poderia atender na forma como foi proposto. A produção de lodo por pessoa pode ser estimada da seguinte forma:

$$\text{Produção de lodo} = 1 \frac{\text{L}}{\text{pessoa} \cdot \text{dia}} \times 145 \text{ dias}$$

$$\text{Produção de lodo} = 145 \frac{\text{L}}{\text{pessoa}} \text{ a cada 3 anos}$$

Logo a produção de lodo anual estimada por pessoa é:

$$\text{Produção de lodo anual} = 145 \frac{\text{L}}{\text{pessoa}} \times \frac{1}{3 \text{ anos}}$$

$$\text{Produção de lodo anual} \approx 50 \frac{\text{L}}{\text{pessoa} \cdot \text{ano}}$$

Sendo 8 horas o tempo de duração de cada batelada de tratamento no reator, no período do dia de maior disponibilidade de radiação solar, e mantendo a quantidade de lodo avaliada nesse estudo, temos que é possível o tratamento de  $200 \text{ L.dia}^{-1}$  de lodo.

Observamos que nas condições climáticas de Florianópolis/SC, não foi possível a utilização do reator em todas as épocas do ano. Para fins de cálculo, suponha-se que apenas em 80 dias do ano o reator seja

operado satisfatoriamente. Assim, o volume de lodo tratado anualmente seria:

$$\text{Volume de lodo tratado anual} = 200 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \times \frac{80 \text{ dias}}{\text{ano}}$$

$$\text{Volume de lodo tratado anual} = 16.000 \frac{\text{L}}{\text{ano}}$$

Logo, o número de pessoas atendidas no ano seria:

$$\text{Número de pessoas} = \frac{16.000 \frac{\text{L}}{\text{ano}}}{50 \frac{\text{L}}{\text{pessoa} \cdot \text{ano}}} \approx 320 \text{ pessoas}$$

Ou aproximadamente 80 famílias de quatro membros cada.

Se o sistema for implantado em uma localidade onde os índices de irradiação solar são altos e com pouca variabilidade mensal, esse número pode ser elevado consideravelmente. Por exemplo, se fossem realizadas 160 bateladas ao ano, o número de pessoas atendidas dobraria, passando para 640 pessoas atendidas. Esses números podem ser expressivos se considerados aplicações descentralizadas em comunidades rurais, condomínios ou mesmo pequenas cidades.