

EMERSON DILAY

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ENGENHARIA DE SISTEMAS:  
ACONDICIONAMENTO DE ELETRÔNICOS, NAVIOS ELÉTRICOS E  
FOTOBIORREACTORES

CURITIBA

2013

EMERSON DILAY

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ENGENHARIA DE SISTEMAS:  
ACONDICIONAMENTO DE ELETRÔNICOS, NAVIOS ELÉTRICOS E  
FOTOBIORREACTORES

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção de grau de Doutor. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. José Viriato Coelho Vargas, Ph.D.

Co-orientadores: Prof. Juan Carlos Ordonez, Ph.D.

Prof. André Bellin Mariano, D.Sc.

CURITIBA

2013

---

D576m

Dilay, Emerson

Modelagem e simulação para engenharia de sistemas: acondicionamento de eletrônicos, navios elétricos e fotobiorreatores [manuscrito] / Emerson Dilay. – Curitiba, 2013.

198f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2013.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas -- Co-orientadores: Juan Carlos Ordonez; André Bellin Mariano.

1. Materiais - Engenharia. 2. Engenharia de sistemas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Ordonez, Juan Carlos. IV. Mariano, André Bellin. V. Título.

CDD: 620.11

---



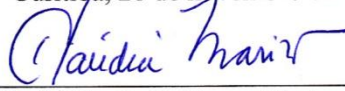
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais  
Setor de Tecnologia


### RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

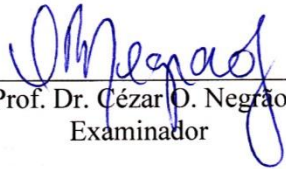
Aos vinte e seis dias do mês de novembro de 2013, na Sala do NPDEAS- no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Sofia Clímaco Monteiro de Oliveira, coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a quinquagésima oitava defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia de Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: José Viriato Coelho Vargas (UFPR), Cláudia E. Bruno Marino (UFPR), César O. Negrão (UTFPR), Marilda Munaro (UFPR), Jeferson Avila Souza (FURG). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **EMERSON DILAY** a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada “**MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ENGENHARIA DE SISTEMAS: ACONDICIONAMENTO DE ELETRÔNICOS, NAVIOS ELÉTRICOS E FOTOBIOREATORES.**” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

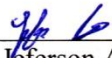
Curitiba, 26 de novembro de 2013.

  
Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas  
Orientador

  
Prof.ª Dr.ª Cláudia E. Bruno Marino  
Examinador

  
Prof.ª Dr.ª Marilda Munaro  
Examinador

  
Prof. Dr. César O. Negrão  
Examinador

  
Prof. Dr. Jeferson Avila Souza  
Examinador

## DEDICATÓRIA

À minha musa inspiradora, Lu.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. JOSÉ VIRIATO COELHO VARGAS, orientador deste trabalho, pela dedicação, paciência e incentivo, sendo sua participação de inestimável valor para esta pesquisa.

À professora Dr. MARIA JOSÉ JERÔNIMO DE SANTANA PONTE, coordenadora do PRH-24 – Programa Interdisciplinar em Engenharia do Petróleo e Gás Natural do Paraná, pelo apoio.

Ao professor Dr. JUAN CARLOS ORDONEZ, co-orientador, pelo apoio e oportunidades.

Ao professor Dr. ANDRÉ BELLIN MARIANO, co-orientador, pelo apoio e contribuições.

Ao professor Dr. CHRISTIAN JOHANN LOSSO HERMES, à professora Dr<sup>a</sup>. CLÁUDIA E. BRUNO MARINO, à professora Dr<sup>a</sup>. MARILDA MUNARO, ao professor Dr. CÉZAR O. NEGRÃO e o professor Dr. JEFERSON ÁVILA SOUZA pelos comentários e contribuições.

Também expresso estima e agradecimentos a todos aqueles, não citados aqui e mesmo assim não menos importantes, que contribuíram com seu tempo, energia, visão, suporte ou amizade, para que este estudo se tornasse possível.

## EPÍGRAFE

*O homem confiante em si, positivo, otimista e que empreende o seu trabalho com segurança de que será coroado de êxito, magnetiza a sua condição. Atrai para si as forças criadoras do Universo.*

Autor desconhecido

## RESUMO

Este trabalho propõe uma formulação matemática simplificada para modelagem e simulação de sistemas de engenharia. A modelagem e simulação a nível de componente é extensamente discutida na literatura. Contudo, a modelagem a nível de sistema, necessária para a otimização global do sistema, ainda é pouco explorada, e representa ainda um desafio a ser vencido. Uma modelagem simplificada em uma malha que impõe uma dependência espacial artificial é utilizada aqui no desenvolvimento de um aplicativo computacional capaz de representar o comportamento de diversos sistemas. O domínio do sistema é dividido em elementos de volume. Para cada elemento de volume, representando um volume de controle da Termodinâmica Clássica, são escritas as equações de conservação de energia e massa. São utilizadas correlações empíricas de transferência de calor e massa. As propriedades dentro de cada elemento são tidas como homogêneas e não dependem do espaço. A dependência espacial é artificial e imposta pela malha. No caso de haver escoamento, este é calculado a priori aproximadamente e depois imposto ao sistema. A representação de todo um sistema por uma malha de elementos de volumes centrados de caráter essencialmente heterogêneo representa um dos aspectos inéditos deste trabalho. Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida foram modelados e simulados três diferentes sistemas: i) acondicionamento de eletrônicos de potência tipo PEBB (*Power Electronic Building Block*), ii) navio inteiramente elétrico e, iii) fotobiorreator para produção de biomassa a ser utilizada na fabricação de biodiesel. O fluxo luminoso incidente nos tubos do sistema fotobiorreator foi avaliado com um algoritmo de *ray tracing* inovador. Foi realizado um conjunto de experimentos de laboratório com o acondicionamento PEBB. Estes dados ajustaram e validaram o modelo. No caso do navio, na impossibilidade de realizar experimentos, foi feita uma análise transiente do comportamento térmico com uso do modelo validado experimentalmente para o PEBB. Os resultados da simulação do sistema fotobiorreator foram comparados com resultados experimentais levantados nos protótipos que foram construídos no laboratório do NPDEAS/UFPR obtendo boa concordância qualitativa e quantitativa. O modelo proposto foi capaz de prever de forma rápida os perfis de temperatura,



umidade relativa e frações mássicas de diferentes espécies em crescimento em fotobiorreator. A altura do fotobiorreator foi otimizada demonstrando as possibilidades de uso prático do modelo, notando que o ótimo encontrado é bastante acentuado, apresentando uma variação de até 400% na produtividade dentro da faixa de valores testados para a altura do fotobiorreator que foi de 1 a 16 metros.

## ABSTRACT

This paper proposes a simplified mathematical formulation for modeling and simulation of integrated engineering systems. The modeling and simulation at the component level is widely discussed in the literature. However, modeling at the system level, required for system global optimization, is not well explored, and represents the next frontier to be overcome. A simplified modeling in a mesh imposing an artificial spatial dependence is used here to develop a software capable of representing the behavior of many systems. The system domain is divided into volume elements. For each volume element, representing a volume control of Classical Thermodynamics, are written the conservation equations of mass and energy. Empirical correlations are used for heat and mass transfer. The properties within each element are taken as homogeneous and do not depend on space. The spatial dependence is artificial and imposed by the mesh. In case of flow, this is approximately calculated in advance and then imposed on the system. The representation of a whole system by an element mesh volumes centered volume elements of essentially heterogeneous character is one of the innovative aspects of this work. To demonstrate the applicability of the developed methodology, were modeled and simulated three different systems: i) packaging power electronic type PEBB (Power Electronic Building Block), ii) all-electric ship, and iii) photobioreactor for the production of biomass to be used in biodiesel production. The luminous flux incident on the tubes of the photobioreactor system was evaluated with a innovative ray tracing algorithm. It was conducted a series of laboratory experiments with PEBB packaging. These data adjusted and validated the model. In the case of the ship, unable to perform experiments, an analysis of the transient thermal behavior using the experimentally validated model for PEBB was conducted. The results of the photobioreactor system simulation were compared with experimental results raised from the prototypes that were constructed in the laboratory of NPDEAS/UFPR getting good qualitative and quantitative agreement. The proposed model was able to predict quickly the profiles of temperature, relative humidity and mass fractions of different species growing in photobioreactor. The height of the photobioreactor was optimized demonstrating the possibilities of practical use of the model, noting that the optimum

found is quite sharp, having a range of up to 400 % in productivity within the range of values tested for the height of the photobioreactor, 1 up to 16 meters.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 -	SISTEMAS S – PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS	32
FIGURA 2.1 -	RELAÇÃO ENTRE PRECISÃO E TAMANHO DO MODELO MATEMÁTICO	38
FIGURA 3.1 -	FLUXOGRAMA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FÍSICOS	66
FIGURA 3.2 -	ELEMENTO DE VOLUME TÍPICO COM TAXAS DE GRANDEZAS	70
FIGURA 3.3 -	VISTA ESQUEMÁTICA DO PEBB	87
FIGURA 3.4 -	PROJETO DO FEIXE TUBULAR DE UM FOTOBIORREATOR CONSTRUÍDO NA UFPR-NPDEAS	89
FIGURA 3.5 -	ELEMENTO DE VOLUME PAREDE E ELEMENTO MEIO DE CULTIVO	92
FIGURA 3.6 -	DETERMINAÇÃO DE ÁREAS DE SOMBRA USANDO RAY-TRACING	101
FIGURA 3.7 -	MALHA IRREGULAR PARA FOTOBIORREATOR APRESENTADA PELO VISIT	105
FIGURA 3.8 -	DETALHE DO CASCO DE UM NAVIO TIPO DDG-51 REPRESENTADO POR TRIÂNGULOS DE UM ARQUIVO TIPO STL	107
FIGURA 3.9 -	REGRA DA MÃO DIREITA NUMERANDO OS ELEMENTOS TRIDIMENSIONAIS DE OITO NÓS	109

FIGURA 3.10-	BLOCO INICIAL DE ELEMENTOS TRIDIMENSIONAIS DE OITO NÓS	110
FIGURA 3.11 -	RAIOS CRUZANDO UM POLIGONO DE 27 LADOS	111
FIGURA 3.12 -	INTERSECÇÃO RAIOS-TRIÂNGULO	112
FIGURA 4.1 -	GABINETE DO CONVERSOR	117
FIGURA 4.2 -	BANCO DE RESISTENCIAS USADO COMO CARGA	118
FIGURA 4.3 -	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	118
FIGURA 4.4 -	FOTOBIOREATOR Nr 1 DESENVOLVIDO PELO NPEDAS-UPPR-CURITIBA-BRASIL	124
FIGURA 4.5-	TANQUE DE PROPAGAÇÃO	125
FIGURA 4.6-	MINI-FOTOBIOREATOR	126
FIGURA 4.7 -	CORRELAÇÃO ENTRE BIOMASSA SECA E NÚMERO DE CELULAS POR ML OBTIDA POR MEIO DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E REGRESSÃO LINEAR	128
FIGURA 5.1 -	TEMPERATURA DOS COMPONENTES	130
FIGURA 5.2 -	TEMPERATURA DO AR	131
FIGURA 5.3 -	EXPERIMENTO 11,12 KW	132
FIGURA 5.4 -	SIMULAÇÃO 11,12 KW	136
FIGURA 5.5 -	TEMPERATURA DO DISSIPADOR	138
FIGURA 5.6 -	TEMPERATURA DO INDUTOR	138
FIGURA 5.7 -	TEMPERATURA DO FUSIVEL CA	139
FIGURA 5.8 -	TEMPERATURA DO FUSÍVEL CC	139

FIGURA 5.9 -	TEMPERATURA DOS CAPACITORES	140
FIGURA 5.10 -	TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T5 (53,24,18) cm	141
FIGURA 5.11 -	TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T24 (79,24,22) cm	141
FIGURA 5.12 -	TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T25 (78,28,50) cm	142
FIGURA 5.13 -	CONDUTÂNCIA TÉRMICA	144
FIGURA 5.14 -	RESPOSTA TÉRMICA TRANSIENTE	145
FIGURA 5.15 -	IMAGEM CAD DE UM NAVIO DDG-51	146
FIGURA 5.16 -	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS EQUIPAMENTOS NOCIONAIS E CIRCUITOS DE RESFRIAMENTO	147
FIGURA 5.17 -	DISTRIBUIÇÃO DAS ZONAS DO NAVIO E SISTEMA DE COORDENADAS DA MARINHA DOS EUA	148
FIGURA 5.18 -	MALHA CONVERGIDA DO NAVIO VIRTUAL COM FORMA EXTERNA DO DESTROYER DDG-51	150
FIGURA 5.19 -	CAMPO DE TEMPERATURA EXTERNO (DIA DE 260K)	153
FIGURA 5.20 -	CAMPO DE TEMPERATURA NO PLANO MÉDIO DO NAVIO (DIA DE 260K)	154
FIGURA 5.21 -	CAMPO DE TEMPERATURA EXTERNO (DIA DE 305K)	155
FIGURA 5.22 -	CAMPO TEMPERATURA NO PLANO MÉDIO DO NAVIO (DIA DE 305K)	156
FIGURA 5.23 -	CAMPO DE UMIDADE RELATIVA NO PLANO MÉDIO DO NAVIO (DIA DE 305K)	156
FIGURA 5.24 -	VARIAÇÃO TEMPERATURA DO STBD-M-DCS-ZONA 2	158
FIGURA 5.25 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA RADAR ZONA 5	158

FIGURA 5.26 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR DE BORDO ZONA 3	159
FIGURA 5.27 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR DE BORDO ZONA 3	160
FIGURA 5.28 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO STBD-M-DCS-ZONA-2	161
FIGURA 5.29 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO RADAR ZONA 5	162
FIGURA 5.30 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR ZONA 3	163
FIGURA 5.31 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR DE BORDO ZONA 3	163
FIGURA 5.32 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO STBD-M-DCS-ZONA-2	165
FIGURA 5.33 -	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA RADAR ZONA 5	165
FIGURA 5.34-	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR ZONA 3	166
FIGURA 5.35	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR DE BORDO ZONA 3	166
FIGURA 5.36	EVOLUÇÃO TEMPORAL SIMULADA DA FRAÇÃO MÁSSICA DE MICROALGAS COMPARADA COM DADOS EXPERIMENTAIS	169
FIGURA 5.37	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR DO AMBIENTE EXTERNO ASSUMINDO TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS IGUAIS TODOS OS DIAS	169
FIGURA 5.38	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO MEIO DE CULTIVO	170

FIGURA 5.39	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DA PAREDE DO TUBO	171
FIGURA 5.40	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub>	172
FIGURA 5.41	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE O <sub>2</sub>	172
FIGURA 5.42	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE NITRATO	174
FIGURA 5.43	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO FOSFATO	175
FIGURA 5.44	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE POTÁSSIO	175
FIGURA 5.45	EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE FERRO	176
FIGURA 5.46	EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS OUTRAS ESPÉCIES	177
FIGURA 5.47	EVOLUÇÃO TEMPORAL SIMULADA DO pH DO MEIO	178
FIGURA 5.48	CURVAS DE CRESCIMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE MICROALGAS PARA DIFERENTES NUMEROS DE LINHAS DE TUBOS	179
FIGURA 5.49	CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MICROALGAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO	180
FIGURA 5.50	CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO <sub>2</sub> EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO	181
FIGURA 5.51	CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE O <sub>2</sub> EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO	182
FIGURA 5.52	PRODUTIVIDADE EM FUNÇÃO DA ALTURA DO FBR MANTENDO A SUPERFÍCIE OCUPADA FIXA	183



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 -	CLASSIFICAÇÃO DAS MODELAGENS	33
TABELA 3.1 -	VALORES PARA A EQUAÇÃO DO CAMPO ESCALAR GERAL	72
TABELA 4.1 -	LISTA DE INSTRUMENTOS USADOS NA AQUISIÇÃO DE DADOS	119
TABELA 4.2 -	LISTA DE TERMISTORES	120
TABELA 5.1 -	MALHA CONVERGIDA	133
TABELA 5.2 -	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS EQUIPAMENTOS	134
TABELA 5.3 -	DIMENSÕES E POSIÇÕES DOS EQUIPAMENTOS	134
TABELA 5.4 -	GERAÇÃO DE CALOR DOS COMPONENTES	134
TABELA 5.5 -	VALORES DE CORREÇÃO DE VOLUME E SUPERFÍCIE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	135
TABELA 5.6 -	POSIÇÕES E DIMENSÕES DOS EQUIPAMENTOS DO NAVIO INTEIRAMENTE ELETRICO	149
TABELA 5.7 -	DIMENSÕES DO NAVIO VIRTUAL E TAMANHO DA MALHA	150
TABELA 5.8 -	CONSTANTES ESTEQUIOMÉTRICAS NOS NUTRIENTES	173
TABELA 5.9 -	CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E DE BIOMASSA ALGAL INICIAL E FINAL	173

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos

A	área, $m^2$ , fator de frequência
$B_a$	limite intrínseco da grandeza a
c	calor específico, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ , centro
d	diâmetro, m
D	difusividade, $m^2\ s^{-1}$
e	espessura, m
E	energia de ativação, J
FF	fator de forma
G	grandeza
g	aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$
H	altura, m
h	coeficiente de convecção, $J\ m^2\ K^{-1}$
I	irradiação, $W\ m^{-2}$
k	condutividade térmica, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
k	constante de ionização,
L	comprimento, m
m	massa, kg
n	número de equações
p	pressão, Pa
$P_a$	limite de precisão da grandeza a
Pr	número de Prandtl
Q	calor, J
R	relação estequiométrica, constante universal dos gases, $kJ\ kmol^{-1}\ K^{-1}$
r	raio, m
Ra	número de Rayleigh
Re	número de Reynolds

t	tempo, s
T	temperatura, K
U	coeficiente global de transferência de calor, $W m^{-2} K^{-1}$
u	velocidade, $m s^{-1}$
$U_a$	incerteza da grandeza a
v	velocidade, $m s^{-1}$
V	Volume, $m^3$
w	concentração, $g l^{-1}$
W	trabalho, J
Y	fração mássica
z	zênite, rad

### Símbolos Gregos

$\alpha$	difusividade, $m^2 s^{-1}$ , absorvidade, taxa de manutenção, $s^{-1}$
$\beta$	coeficiente de expansão térmica e volumétrica, $K^{-1}$
$\varepsilon$	emissividade, norma euclidiana, efetividade
$\delta$	espessura, m, declinação solar, rad
$\rho$	densidade, $kg m^3$
$\phi$	campo escalar geral, latitude, rad
$\nu$	viscosidade cinemática, $m^2 s^{-1}$
$\sigma$	desvio padrão, constante de Stefan-Boltzman, $W m^{-2} K^{-4}$
$\mu$	taxa de crescimento, $s^{-1}$
$\psi$	taxa de crescimento adimensional
$\tau$	temperatura adimensional
$\varphi$	umidade relativa

## Sobrescritos

.	taxa
~	adimensional
→	vetor

## Subscritos

a	area
av	média
b	fundo
conv	convecção
e	leste, equivalente, espessura
f	final, fluido
fan	ventilador
free	livre
gen	gerado
i	inicial, número do elemento de volume
ins	isolamento
j	posição da face do elemento de volume
ldg	comprimento do degasser, m
n	norte, vetor normal, convecção natural
s	sul, saturado
Sat	saturação
sky	céu
t	topo, total
v	vapor
w	oeste, parede
·	valor absoluto

$\  \cdot \ $	norma Euclidiana
$[ \cdot ]$	concentração molar, mol L <sup>-1</sup>
0	inicial
$\infty$	ambiente

## LISTA DE SIGLAS

ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> – Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
CAPS-FSU	<i>Center for Advanced Power Systems-Florida State University</i> – Centro para Sistemas de Potência Avançados na Universidade Estadual da Flórida
COP	Coeficiente de Performance
CWU	<i>Chilled Water Unit</i> - Unidade de água gelada
DF	Diferenças finitas
DFC	Dinâmica de Fluido Computacional
EF	Método de elementos finitos
ESRDC	<i>Electric Ship Research and Development Consortium</i> - Consórcio de Pesquisa e Desenvolvimento do Navio Elétrico
EV	Elemento de volume
FBR	Fotobiorreator
IPPE	<i>Inverse Problem of Parameter Estimation</i> – Problema inverso de estimativa de parâmetros
MVDC	<i>Medium Voltage Direct Current</i> - Corrente contínua de tensão média
MEV	Método de Elementos de Volume
NPDEAS /UFPR	Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável na Universidade Federal do Paraná

ONR	<i>Office of Naval Research</i> - Escritório de Pesquisa Naval
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i> - Radiação fotossinteticamente ativa
PEBB	<i>Power Electronics Building Blocks</i> – Blocos de Eletrônica de Potência
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i> - Célula a Combustível de Óxido Sólido
STL	<i>Stereolithography</i> - Arquivo no formato de estereolitografia
SWHX	<i>Sea Water Heat Exchanger</i> - Tocador de calor com água do mar
VF	Volumes finitos
VTK	<i>Visualization Toolkit</i> – arquivo no formato VTK

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>28</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO .....	28
1.2 ENGENHARIA DE SISTEMAS.....	30
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	34
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
2.1 HISTÓRICO .....	35
2.2 MODELAGEM DE ORDEM BAIXA .....	39
2.2.1 Sistemas de absorção .....	39
2.2.2 Sistemas de refrigeração por compressão de vapor .....	41
2.2.3 Sistemas com células a combustível.....	43
2.2.4 Sistemas com trocadores de calor .....	44
2.2.5 Sistemas em edifícios.....	46
2.2.6 Outros sistemas .....	47
2.3 MODELAGEM DE ORDEM ALTA.....	47
2.3.1 Sistemas com trocadores de calor .....	48
2.3.2 Sistemas da indústria alimentícia .....	49
2.3.3 Sistemas envolvendo hidrogênio.....	51



2.3.4	Sistemas de transferência de calor .....	53
2.3.5	Sistemas com reações químicas .....	54
2.3.6	Sistemas de geração de energia elétrica .....	55
2.3.7	Outros sistemas .....	56
2.4	APLICAÇÕES EM ENGENHARIA DE SISTEMAS .....	57
2.4.1	Acondicionamento de eletrônicos PEBB .....	57
2.4.2	Navio inteiramente elétrico virtual .....	59
2.4.3	Fotobiorreator .....	60
2.5	DESAFIOS .....	63
2.6	OBJETIVOS .....	64
2.6.1	Objetivo geral .....	64
2.6.2	Objetivos específicos.....	65
<b>3</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>66</b>
3.1	ANÁLISE .....	67
3.2	MODELO GERAL.....	70
3.2.1	Taxas de transferência de calor através das faces dos elementos .....	74
3.2.2	Fluidos refrigerantes e suas taxas de transferência de calor .....	80
3.3	MODELO PARA ACONDICIONAMENTO DE ELETRÔNICOS PEBB.....	86
3.4	MODELO PARA NAVIO INTEIRAMENTE ELÉTRICO NOCIONAL .....	87
3.5	MODELO ADIMENSIONAL PARA FOTOBIORRETORES COMPACTOS.....	88

3.5.1 Grupos adimensionais.....	90
3.5.2 Feixe tubular.....	91
3.5.3 Coluna de gaseificação/degaseificação .....	97
3.5.4 Reservatório .....	98
3.5.5 Cálculo do pH do meio de cultivo .....	99
3.5.6 Radiação solar .....	99
3.5.7 Radiação solar direta e difusa em fotobiorreatores compactos.....	100
3.6 MÉTODO NUMÉRICO .....	103
3.7 GERADOR DE MALHAS CUSTOMIZADO .....	105
3.7.1 Extração da geometria de um arquivo STL .....	106
3.7.2 Geração do bloco de malha hexaédrica .....	108
3.7.3 Malha com formato real.....	110
3.7.4 Propriedades físicas dos elementos.....	113
3.7.5 Arquivos de saída.....	114
<b>4 EXPERIMENTOS.....</b>	<b>116</b>
4.1 CONVERSOR PEBB.....	116
4.1.1 Descrição da unidade experimental PEBB.....	117
4.1.2 Análise das incertezas experimentais no teste PEBB .....	120
4.1.3 Procedimento experimental.....	121
4.2 FOTOBIORREATOR.....	122

4.2.1 Fotobiorreator em escala piloto .....	123
4.2.2 Tanque de propagação .....	124
4.2.3 Mini-fotobiorreator .....	125
4.2.4 Análise de incertezas experimentais .....	126
4.2.5 Procedimento experimental.....	127
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>129</b>
5.1 MODELO PEBB .....	129
5.1.1 Resposta térmica transiente e estacionária experimental do PEBB.....	129
5.1.2 Ajuste do modelo PEBB .....	133
5.1.3 Validação experimental do modelo PEBB .....	135
5.1.4 Simulação do PEBB .....	142
5.2 NAVIO INTEIRAMENTE ELÉTRICO.....	145
5.2.1 Carga térmica e estratégias de resfriamento.....	146
5.2.2 Geração de malha.....	150
5.2.3 Condições de simulação .....	151
5.2.4 Campo de temperatura e umidade relativa .....	152
5.2.5 Simulação dinâmica da variação da potência total.....	157
5.2.6 Simulação dinâmica da variação de vazão de água de resfriamento.....	160
5.2.7 Simulação dinâmica da variação de capacidade dos <i>chillers</i> .....	164
5.3 FOTOBIORREATOR.....	167

5.3.1 Comparação dos resultados do modelo matemático com dados experimentais .....	168
5.3.2 Resultados do modelo matemático para concentrações de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .....	171
5.3.3 Resultados do modelo matemático para concentrações de nutrientes .....	173
5.3.4 Resultados do modelo matemático para demais espécies presentes no meio .....	176
5.3.5 Resultados do modelo matemático para pH.....	177
5.3.6 Otimização da altura do fotobiorreator .....	178
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>184</b>
6.1 CONCLUSÕES .....	184
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	186
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>188</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A modelagem matemática, simulação e otimização termodinâmica para engenharia de sistemas é uma das formas para aumento da eficiência energética, da redução de custos e da diminuição de impacto ambiental em todas as atividades exercidas pelo homem no planeta. Um dos caminhos possíveis para atingir esse objetivo é a minimização da geração de entropia do sistema, i.e., das irreversibilidades que ocorrem em todos os sistemas reais. Contudo, a otimização de um sistema ou conjunto de sistemas trabalhando juntos, requer a análise, ou simulação, de uma multiplicidade de configurações diferentes. Cada configuração representa um conjunto de parâmetros de projeto e operação diferente.

Assim, desde o início desta Tese, é importante apresentar uma definição do que seja engenharia de sistemas a fim de situar o leitor. Engenharia de sistemas é um campo interdisciplinar da engenharia que foca no desenvolvimento e organização de sistemas artificiais complexos (HALL, 1962; SAGE, 1992). Uma definição de Engenharia de Sistemas provém do INCOSE (*International Council of Systems Engineering*) e conceitua que "a Engenharia de Sistemas é uma abordagem interdisciplinar que torna possível a concretização de 'Sistemas' de elevada complexidade. O seu foco encontra-se em definir, na fase de desenvolvimento preliminar de um sistema, as necessidades do usuário, bem como as funcionalidades requeridas, realizando a documentação sistemática dos requisitos, e abordando a síntese de projeto e a etapa de validação de forma a considerar o problema completo" (HONOUR, 1998).

As técnicas de engenharia de sistemas são utilizadas desde projetos complexos de espaçonaves ao projeto de chips, da robótica à criação de *softwares* para construir pontes. A engenharia de sistemas utiliza um conjunto de ferramentas

que incluem modelagem e simulação (SAGE, 1992). Podem ser citados como exemplos de engenharia de sistemas, projetos e desenvolvimento de navios civis ou de combate, aeronaves, processos de refino de petróleo, usinas de geração de energia, e até mesmo processos bioenergéticos em que sistemas vivos devem interagir com máquinas a fim de realizar um propósito que beneficie a sociedade humana.

Após essa definição, fica evidente que à medida que a sociedade de consumo evolui, esses sistemas passam a ser mais complexos. A multidisciplinaridade de seus componentes impõe grandes desafios para o projetista. Além disso, os custos de construção de protótipos que podem não ser funcionais se tornam proibitivos. Portanto, deste cenário emerge a ferramenta de simulação como a forma de viabilizar o desenvolvimento e análise desses sistemas antes do investimento financeiro. No entanto, mesmo os computadores mais avançados possuem uma capacidade de processamento finita e este limite restringe o tamanho da ferramenta de simulação. Portanto, a escolha do grau de complexidade de um equacionamento matemático ou modelo representativo de um sistema é um ponto crítico de projeto de engenharia de sistemas.

Ao nível de componentes, em particular, as técnicas de modelagem matemática são maduras, precisas e robustas. No entanto, ao nível de engenharia de sistemas, o problema adquire complexidade muito maior, e o estado-da-arte não está igualmente avançado comparativamente ao nível de componente. Assim, a introdução de abordagens de modelagem, simulação e otimização, ao nível de engenharia de sistemas ainda é um desafio a ser vencido.

Mesmo ao nível de componente, com a modelagem do sistema, o aumento de complexidade dos problemas abordados demanda o uso de computadores de alta velocidade de cálculo, arquitetura de *hardware* e geradores de malha sofisticados para simulação de fenômenos específicos. Para tanto, são utilizados métodos numéricos apropriados para a solução do modelo matemático que apresente dependência temporal e espacial.

Ao nível de engenharia de sistemas, verifica-se atualmente a necessidade de otimização com vários componentes interagindo entre si, cuja simulação numérica,

por meio da completa discretização do seu domínio, requer tempos computacionais elevados, para análise de apenas um conjunto de parâmetros. Portanto, devido a essa constatação, ainda é uma barreira quase intransponível uma otimização de parâmetros de tais sistemas complexos com as ferramentas computacionais existentes, i.e., considerando dependência temporal e espacial.

Pelo exposto, fica clara a necessidade de desenvolvimento de ferramentas matemáticas e computacionais simplificadas até para viabilizar a solução de modelos matemáticos complexos. A motivação principal é a obtenção de resultados numéricos de precisão aliados a baixos tempos computacionais para permitir a análise de muitas configurações alternativas possíveis de projeto em tempo aceitável.

## 1.2 ENGENHARIA DE SISTEMAS

De acordo com a definição apresentada na seção anterior, são exemplos de projetos de engenharia de sistemas: sistemas de geração de energia (cogeração), sistemas de potência a bordo de navios (com vários sistemas de reaproveitamento de energia interligados à propulsão, radares e sistemas de armas), sistemas de extração e processamento de petróleo a bordo de plataformas, sistemas aeronáuticos e sistemas de geração de energias renováveis interligados, sistemas aeroespaciais, robótica, condicionamentos de eletrônicos, navios inteiramente elétricos, fotobiorreatores, entre outros.

Os sistemas de geração de potência, distribuição e controle, acumulação de energia, transferência de calor e gerenciamento térmico, motores e atuadores, presentes em navios elétricos como reportado por Wagner (2007) são considerados integrados, pois são altamente dependentes entre si em operações ótimas e sincronizadas. A geração de calor está presente em todos eles, em diferentes níveis, principalmente como resultado de operações de lançamento de objetos (SMITH,

2005), de propulsão (KANERVA, 2009), de armas de alta energia e de radares. O mau gerenciamento térmico pode evidentemente levar a um evento inesperado e, em último caso, à falha mecânica ou elétrica dos sistemas em detrimento da missão de combate do navio (SOMAN, 2009).

A FIGURA 1.1 apresenta o diagrama esquemático de um exemplo de engenharia de sistema bioenergético. Este sistema está em desenvolvimento no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia autossustentável da Universidade Federal do Paraná (NPDEAS/UFPR), e tem como objetivo viabilizar um prédio autossustentável, no qual a energia utilizada será oriunda do biodiesel produzido pelo próprio NPDEAS. Na figura, a linha roxa representa os gases da queima do biodiesel sendo injetado no fotobiorreator empregado no cultivo de microalgas. Pela linha verde observa-se que a biomassa de microalgas é coletada do fotobiorreator, e o restante do meio de cultivo é novamente utilizado nos próximos cultivos como mostra a linha cinza. A linha amarela mostra o óleo extraído da biomassa microalgal usado para obtenção de biodiesel, que é então usado como combustível para um sistema trigerador instalado no prédio, fechando o ciclo de reaproveitamento energético. Os restos sólidos da extração do óleo também são reaproveitados em um processo de biodigestão, como mostrado pela linha alaranjada, que gera biogás, composto principalmente de metano, que também pode ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica.



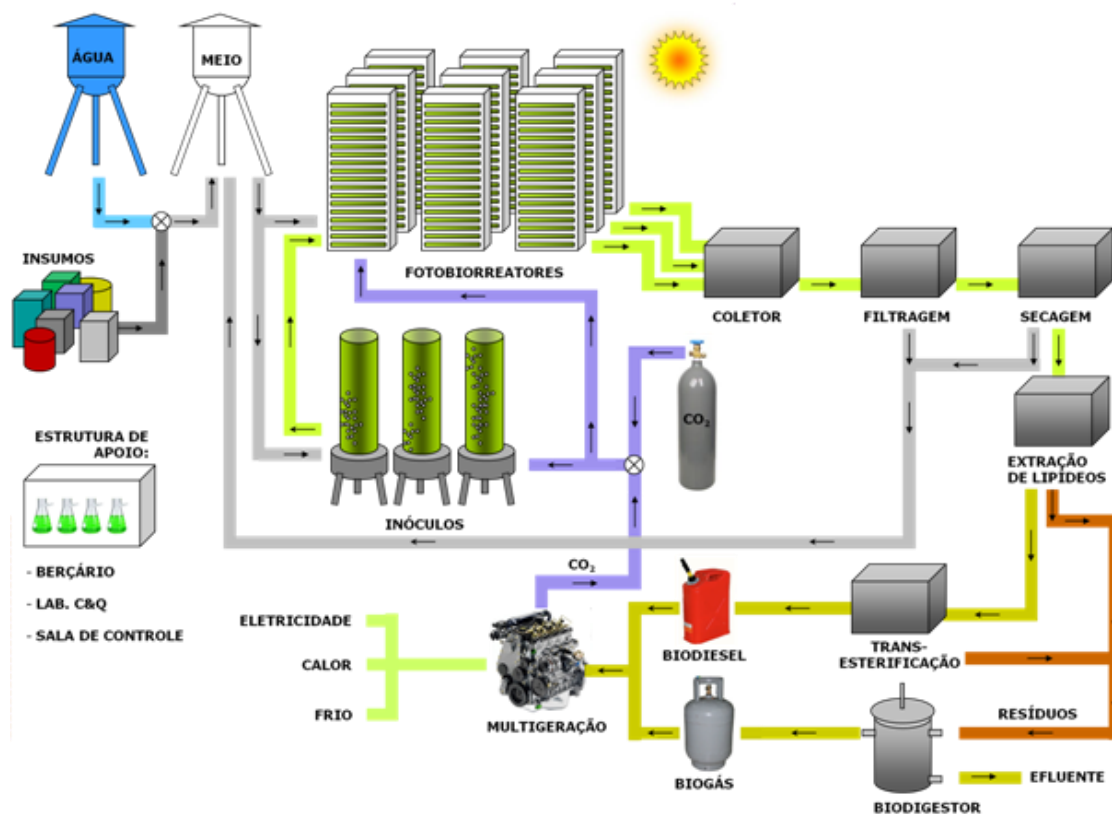


FIGURA 1.1 – SISTEMAS INTEGRADOS - PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS. FONTE: SATYANARAYANA *et al.* (2011)

A pesquisa para desenvolvimento de sistemas complexos requer o acesso à resposta do sistema em um período de tempo aceitável. Assim, uma ferramenta de simulação que seja capaz de prover resposta rápida durante os primeiros estágios do projeto é necessária. Dessa forma, a viabilidade física pode ser demonstrada através de modelagem e simulação em nível global do sistema. Para isso, é preciso o desenvolvimento de modelos físicos, elétricos, biológicos, térmicos e mecânicos do problema como um todo.

No desenvolvimento do modelo matemático é necessário identificar os componentes do sistema e determinar as suas características individuais. Tais características são governadas por leis físicas (Leis de Newton, de Kirchhoff, de Fourier, etc., conforme a natureza do sistema) e são descritas em termos dos chamados parâmetros (ou propriedades) e variáveis do sistema. Os sistemas podem ser divididos em duas grandes classes, conforme a natureza de suas variáveis: aqueles cujas variáveis não dependem das coordenadas espaciais, chamados sistemas com parâmetros e variáveis concentrados, e aqueles dependentes das coordenadas espaciais, denominados sistemas com parâmetros e variáveis

distribuídos. No primeiro caso, a excitação e a resposta dependem apenas do tempo, logo são descritos por equações diferenciais ordinárias; sendo que no caso de parâmetros distribuídos, a excitação e a resposta dependem do tempo e das coordenadas espaciais, logo são descritos por equações diferenciais parciais (mais de uma variável independente).

De uma maneira geral, é aceita a classificação de modelagens matemáticas quanto ao nível de sistemas e de componentes (HALL, 1962; SAGE, 1992). Várias denominações são apresentadas na literatura para essas duas classificações, donde são listadas as seguintes: i) modelagem qualitativa, i.e., com precisão de tendências de resposta, mas com baixa precisão de valores absolutos ou locais das variáveis, e modelagem quantitativa, i.e., com precisão de tendências de resposta e de valores locais das variáveis (WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS *et al.*, 2001); ii) Modelagem de ordem alta (*high order*) e ordem baixa (*low order*), conforme apresentado por Shapiro (2003), e iii) Modelagem concentrada e distribuída (TRIVELATO, 2003; KAISER, 2004). Um resumo destas classificações pode ser visto na TABELA 1.1.

TABELA 1.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS MODELAGENS

PRECISÃO DE TENDÊNCIA BAIXA PRECISÃO DE VALORES ABSOLUTOS OU LOCAIS DAS VARIÁVEIS	PRECISÃO DE TENDÊNCIA, ALTA PRECISÃO DE VALORES ABSOLUTOS OU LOCAIS DAS VARIÁVEIS	REFERÊNCIA
Qualitativa	Quantitativa	WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS <i>et al.</i> , 2001
Concentrada	Distribuída	TRIVELATO, 2003; KAISER, 2004
Sistema	Componente	HALL, 1962; SAGE, 1992
Baixa Ordem	Alta Ordem	SHAPIRO, 2003

FONTE: O AUTOR (2013)

Na modelagem matemática quantitativa, ordem alta ou distribuída, é requerida a solução de equações diferenciais parciais, onde o esforço computacional para a solução do equacionamento é elevado. Na modelagem matemática qualitativa,

ordem baixa ou concentrada, é requerida apenas a solução de equações diferenciais ordinárias. Assim, a escolha entre os dois tipos de modelagem é uma decisão que depende do escopo da análise, e que é detalhadamente discutida nesta Tese nas seções de revisão bibliográfica e de metodologia.

Nesta Tese, adota-se simplesmente como uma escolha do autor a denominação de modelagem matemática de ordem baixa e alta.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está organizada a partir da contextualização e motivações descritas neste Capítulo 1. O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica. O Capítulo 3 traz a modelagem matemática usando o assim chamado método de elementos de volume (MEV), proposto por Vargas *et al.* (2001), de três diferentes sistemas de engenharia: (i) fotobiorreatores para produção de microalgas para produção de biodiesel modelado sem malha num estágio inicial do desenvolvimento e posteriormente discretizado com o uso de um gerador de malha desenvolvido neste trabalho, apresentando grupos adimensionais e gráficos normalizados, (ii) conversores de potência eletrônicos do tipo PEBB (*Power Electronics Building Blocks*), e (iii) gerenciamento térmico de navios inteiramente elétricos. O Capítulo 4 descreve todas as unidades experimentais, fotobiorreatores e conversor de potência eletrônico. O Capítulo 5 apresenta o ajuste e validação experimental do modelo matemático do conversor de potência, bem como os resultados obtidos para os três sistemas de engenharia analisados nesta tese são apresentados e discutidos. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. Apresentam-se separadamente as conclusões de cada sistema analisado, bem como uma análise conjunta da contribuição científica da tese para o avanço do estado-da-arte no assunto simulação e otimização de sistemas de engenharia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 HISTÓRICO

A introdução do termo engenharia de sistemas ocorreu nos laboratórios da Bell na década de 1940 em função da necessidade de se estudar as propriedades de um sistema como um todo. Isso pode ser diferente de se estudar cada componente individualmente sem considerar as interações entre eles (HALL, 1962).

A partir do momento em que as ferramentas de projeto de sistemas disponíveis não foram mais suficientes para atender às novas demandas, métodos que abordavam diretamente a complexidade começaram a ser desenvolvidos (SAGE, 1992). Dentre estes métodos está a modelagem matemática e posterior simulação computacional dos sistemas em análise.

Em 1990, foi fundada nos Estados Unidos da América a *National Council on Systems Engineering* (NCOSE), uma sociedade profissional que reunia representantes de diversas empresas e organizações daquele país. A NCOSE foi criada para tratar da crescente necessidade de melhorias nos métodos da engenharia de sistemas e do seu ensino e difusão. Como resultado da crescente participação de engenheiros de sistemas fora dos EUA, o nome da organização foi mudado para *International Council on Systems Engineering* (INCOSE) em 1995. O ramo brasileiro, chamado INCOSE Brasil, foi instituído em 2012 e conta com aproximadamente 60 membros (HONOUR, 1998).

Como citado, um dos métodos de abordagem da complexidade é a modelagem matemática que se entende como sendo a busca de um equacionamento matemático apropriado que represente adequadamente o comportamento ou resposta de um sistema físico. Esta etapa é indispensável para a subsequente programação computacional que visa permitir a simulação do

comportamento ou resposta do sistema físico em análise em computadores, evitando assim despesas decorrentes de investimentos na construção de configurações alternativas até que se aproxime de um sistema funcional que atenda os objetivos desejados pelo projeto.

O conceito de simulação pode ser definido como o processo de verificar a resposta ou comportamento de um sistema real em diferentes configurações alternativas para entender seu comportamento e avaliar estratégias de operação e projeto. No caso de simulação computacional, usa-se um programa computacional escrito a partir de um modelo matemático do sistema em análise. Assim, a simulação tem sido empregada como uma técnica que permite verificar soluções, com a profundidade desejada, aos problemas que ocorrem ou podem ocorrer no funcionamento de diferentes sistemas físicos. Portanto, a simulação permite responder a clássica pergunta: “O que aconteceria se?” sem afetar o sistema real.

O início da história da simulação computacional remonta à Segunda Guerra Mundial e aos problemas envolvendo nêutrons durante o projeto Manhattan. Foi na década de 1960 que a IBM apresentou seus primeiros programas de simulação que foram usados para distribuir dados meteorológicos. Nesta época foram estabelecidos grupos de simulação na Boeing, Martin Marietta, Air Force Logistics Command, General Dynamics, Hughes Aircraft, Raytheon, Celanese, Exxon, Southern Railway entre outros. Nas décadas de 1970 e 1980 houve o aumento do número de fornecedores de sistemas computadorizados. No entanto, o poder das ferramentas de simulação tornou-se evidente na década de 1990, com a popularização dos computadores pessoais padrão IBM PC/AT. Naquela época, uma dessas máquinas demorou 30 dias para simular o processo interno de logística da fábrica de eletrônicos Universal Data Systems.

A simulação em engenharia de sistemas deve avaliar vários conjuntos de parâmetros de operação e projeto do sistema. Como o tempo necessário para a avaliação de apenas uma configuração é grande, o processo de otimização se torna proibitivo. Shapiro (2003) cita, no caso de pacotes eletrônicos, por exemplo, a grande necessidade de se reduzir o tamanho das simulações de transferência de calor para ser possível analisar casos mais complexos e fenômenos físicos adicionais sem perder precisão significativa e, desta forma, reduzir o tamanho dos

eletrônicos. Nos casos citados, a redução de ordem do modelo reduz a precisão da resposta em apenas 5% o que não afeta o projeto nos seus estágios iniciais. Também é importante se beneficiar de correlações empíricas para situações complexas (por exemplo, os fluxos turbulentos através de geometrias complexas).

Os modelos devem ser capazes de realizar uma pesquisa combinatória de parâmetros. No caso de uma simulação que leve um dia para rodar e existam dez parâmetros de interesse e cada parâmetro tenha cinco valores, levaria 267 anos para pesquisar apenas 1% do espaço de projeto. A mesma simulação, demorando apenas um segundo, levaria um dia e meio para realizar a mesma pesquisa, isto é, um tempo pelo menos razoável. Com respeito à complexidade e velocidade, os métodos de modelagem destinados a resolver problemas de simulação de sistemas físicos podem ser classificados como métodos de análise de ordem baixa e alta (SHAPIRO, 2003).

Os modelos de alta ordem levam em consideração mais fenômenos e normalmente utilizam equações diferenciais parciais de ordem mais alta. Daí deriva o nome de modelagem com ordem alta. Devido à própria natureza desta modelagem, mais completa, a precisão dos resultados é maior. No outro extremo, os modelos de baixa ordem são baseados em equações diferenciais parciais ou ordinárias de menor ordem (ordem da derivada de mais alta ordem da função incógnita). Este conceito traz implicações em termos de refino de malha, i.e., a discretização do sistema no espaço, pois, a existência de derivadas espaciais, e não somente temporais, impõe malhas refinadas para que seja possível haver convergência para uma solução.

Denomina-se redução do modelo, FIGURA 2.1, o processo de se tomar um modelo grande ou de ordem alta e reduzir o seu tamanho mantendo a maior parte da precisão. Este processo pode ser exemplificado por um modelo de membrana vibrando como em um tambor. Neste caso, a resposta de posição e fase da membrana pode ser representada pelos poucos primeiros modos de vibração sem prejuízo da precisão. Estes primeiros modos de vibração são os naturais, i.e., dominantes, portanto, os demais modos de vibração pouco contribuem para a resposta do sistema e podem ser desprezados (SHAPIRO, 2003). Redução de

ordem por truncamento balanceado e decomposição ortogonal foram estudadas por Zhou *et al.* (2002) e Sirovich (1987) respectivamente.

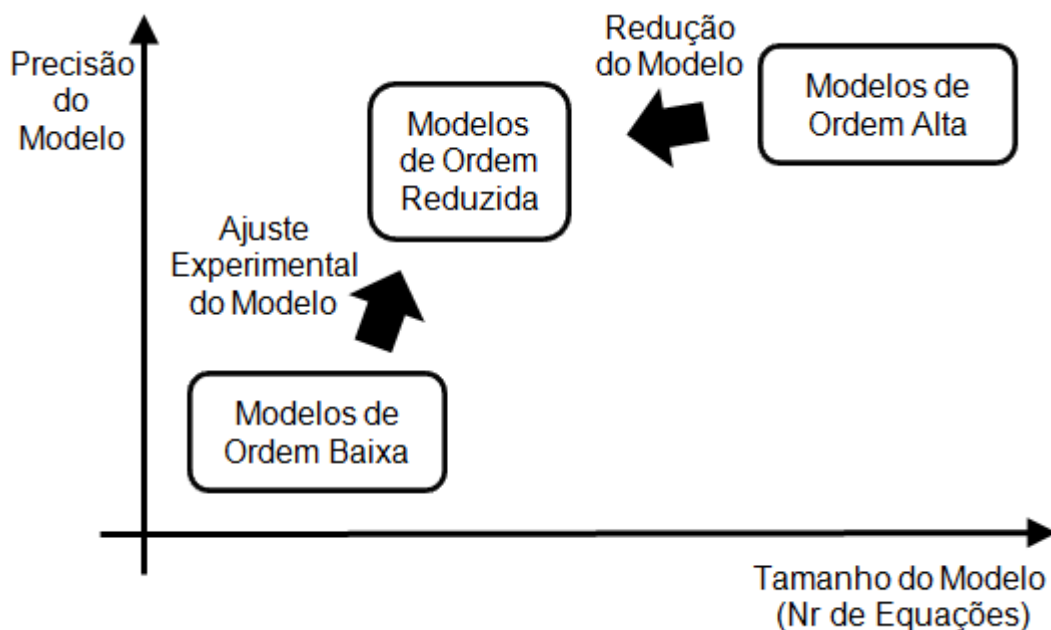


FIGURA 2.1 – RELAÇÃO ENTRE PRECISÃO E TAMANHO DO MODELO MATEMÁTICO  
 FONTE: ADAPTADO DE SHAPIRO (2003)

Outra maneira de se obter um modelo de ordem reduzida é partir de um modelo de baixa ordem e identificar experimentalmente as partes faltantes. Esta fase também é conhecida como ajuste experimental. E, pode ser executada como um problema inverso de estimativa de parâmetros (IPPE) que visa minimizar a diferença entre a saída do modelo e a saída do experimento.

Estes procedimentos visam obter um modelo de ordem reduzida (boa precisão e tamanho razoável) a partir de um modelo de ordem alta (ótima precisão e grande em tamanho) ou de um modelo de ordem baixa (pequeno, mas pobre em precisão).

A seguir, são discutidos trabalhos anteriores na área de simulação de sistemas físicos aplicados à engenharia com o objetivo de caracterizar o estado-da-arte no assunto e apresentar questões ainda em aberto. Os trabalhos são organizados de acordo com a metodologia de modelagem matemática empregada, ou seja, modelagem de ordem baixa ou alta.

Após a revisão bibliográfica, são definidos os objetivos da Tese.

## 2.2 MODELAGEM DE ORDEM BAIXA

Os trabalhos que serão apresentados visam exemplificar os sistemas aos quais foram aplicados modelos de ordem baixa. É importante destacar que estes são apenas alguns exemplos, pois, existem muitos trabalhos publicados que poderiam ser citados aqui. Contudo, foram escolhidos alguns trabalhos, em número suficiente, para demonstrar a aplicação de métodos de ordem baixa com suas vantagens e limitações. Estes trabalhos tratam, na maioria, de sistemas que são integrados por vários equipamentos ou componentes, e não foram escolhidos trabalhos que tratam de fenômenos isolados (locais) ou em pequena escala. A apresentação é organizada por tipo de sistema analisado: sistemas de absorção, sistemas de refrigeração, trocadores de calor, células a combustível, aplicações em edifícios e outros sistemas não enquadrados nas classificações anteriores.

### 2.2.1 Sistemas de absorção

Um trabalho com ciclos de absorção sobre purificação de água do mar foi realizado por Bourouis *et al.* (2004). O transformador de calor por absorção usou a mistura de fluidos  $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ . A natureza do modelo foi estacionária. Foi possível realizar uma análise paramétrica e identificar como o coeficiente de performance (COP) se comporta em função da temperatura de condensação e da temperatura do gerador. Contudo, devido à natureza da modelagem, não foi possível efetuar análises transientes.



Dentro do mesmo tipo de sistema, Romero e Rodrigues-Martinez (2008) estudaram um modelo matemático sobre um sistema de purificação de água salgada usando um transformador de calor por absorção movido a calor residual. A máquina de absorção foi modelada por um volume de controle por componente. Os parâmetros de importância são o COP e a temperatura do calor residual. Foi realizada uma análise paramétrica. A formulação do problema não permitiu uma otimização por não incorporar a geometria dos componentes, isto é, é puramente termodinâmica.

Na mesma linha de pesquisa, Castro *et al.* (2008) modelaram uma máquina de absorção com o par  $\text{H}_2\text{O-LiBr}$  movida a água quente de pequena capacidade dividindo o sistema em volumes de controle. Para manter os tempos computacionais baixos foram usadas fórmulas empíricas para fatores de fricção e coeficientes de transferência de calor. O gerador e o absorvedor foram modelados com dependência espacial. Apesar de o modelo permitir, não foi realizada uma otimização de parâmetros de projeto e operação.

Em outro trabalho sobre ciclos de absorção, uma simulação e estudo de performance de um sistema de refrigeração por absorção de um estágio usando fluidos convencionais e alternativos foram realizados por Karamangil *et al.* (2010). A análise termodinâmica do sistema foi feita usando pares de fluidos comumente encontrados na literatura e foi programado um pacote de software com interface amigável incluindo componentes visuais. Cada componente foi representado como um volume de controle e foram escritos balanços de massa e energia. Foi possível estudar os efeitos das temperaturas em diferentes componentes do sistema sob o desempenho. A natureza puramente termodinâmica do modelo não permite uma otimização da geometria dos componentes.

Kotenko, Moser e Rieberer (2012) simularam três alternativas de processos de bombas de calor por absorção: mistura de fluidos parcialmente miscíveis, fluido auxiliar condensável e processos com bases fortes como aditivos. Os processos foram simulados usando o *software* de fluxograma ASPEN. A otimização dos processos não foi realizada.

Ainda nos ciclos de absorção, Yan *et al.* (2013), publicaram um novo ciclo de refrigeração por absorção para trabalhar com fontes de calor com grande variação de temperatura. A máquina funciona com o par água e brometo de lítio com simples efeito. O equipamento foi modelado com um volume de controle por componente. A estes volumes foram aplicados balanços de massa e energia. Os dados dos fluidos foram extraídos do programa REFPRO desenvolvido pelo NIST – *National Institute of Standards and Technology*. Foi possível realizar uma análise paramétrica e concluir que o novo ciclo funciona com temperaturas até 20° C menores que os ciclos convencionais. Como o modelo é puramente termodinâmico, não foi possível realizar uma otimização do ponto de vista da geometria dos componentes.

### 2.2.2 Sistemas de refrigeração por compressão de vapor

Nas máquinas de refrigeração, a simulação termodinâmica da recuperação de calor de um *chiller* centrífugo de um estágio foi realizada por Gong *et al.* (2012). A simulação dinâmica foi feita com uso do pacote Simulink do MATLAB. As eficiências energéticas e exergéticas foram calculadas. Devido à natureza do modelo, os aspectos geométricos do equipamento não foram levados em consideração.

Em mais um trabalho sobre ciclos de compressão de vapor, Tso *et al.* (2012) realizaram a análise de performance de um *chiller* movido com adsorvente de carvão ativado e água usando um modelo de simulação. A modelagem foi feita para analisar a influência da temperatura de entrada da água quente, temperatura de entrada da água de resfriamento, temperatura de entrada da água a ser refrigerada e tempo do ciclo de adsorção/desadsorção. O equipamento foi dividido em um volume de controle para cada componente e então foram aplicados os balanços de energia e massa. A análise paramétrica dos resultados do modelo dinâmico mostra que o ciclo ótimo de adsorção/desadsorção dura 360 s. Pela própria natureza do modelo, a influência de detalhes geométricos dos componentes sobre o desempenho do sistema não puderam ser acessados.

Sobre o mesmo ciclo, Blanco *et al.* (2012) simulou o estado estacionário de um ciclo de refrigeração a compressão de vapor para uma bomba de calor com dessuperaquecedor. Um diagrama de blocos foi usado para modelar o compressor e a válvula de expansão eletrônica. Os trocadores de calor foram modelados por um método zonal. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais. O COP calculado pelo modelo permaneceu dentro da banda de 10% em torno dos resultados experimentais. Os resultados mostraram que um grau de superaquecimento constante não afeta o COP. Concluiu-se que a simulação pode ser usada para buscar técnicas de controle e conjunto de parâmetros de projeto e operação que melhorem o COP de forma global, contudo, a otimização não foi realizada.

Como modelagem de bombas de calor, Tamasaukas *et al.* (2012) modelaram e otimizaram uma bomba de calor solar usando gelo como material de armazenamento de calor. O foco da modelagem foi o tanque de gelo o qual foi representado por um volume de controle. Ele foi modelado como um componente para uso no *software* comercial TRNSYS. Cada simulação durante o processo de otimização utilizando o *software* GenOpt demorou 1,25 h usando um computador com processador Intel Core 2 6300 @ 1.86 GHz com 1 Gb de RAM. Foi feita uma otimização local com as seguintes variáveis: área do coletor solar, ângulo do coletor com relação ao Sol, taxa mássica de fluido de trabalho, volume do tanque de gelo e volume do tanque de água quente. Uma otimização global não foi realizada.

Em outra tecnologia de refrigeração, um modelo adimensional para simulação de refrigerador com regenerador magnético ativo foi proposto por Sarlah e Poredos (2010). O modelo produz respostas transientes, mas, não produz informações sobre a variação das grandezas de interesse em função do espaço. O modelo considera o número de Peclet. A análise de sensibilidade demonstrou que os resultados simulados de coeficientes de transferência de calor são 10% maiores que os valores experimentais.

Com foco em compressores aplicados em refrigeração, Sunshuaihui *et al.* (2010) modelaram um compressor tipo *scroll* com refrigeração externa utilizado em sistemas de refrigeração. A refrigeração externa do fluido de trabalho visa reduzir o trabalho de compressão. Os coeficientes de transferência de calor foram calculados

via correlações empíricas. Uma equação do volume da câmara de compressão foi escrita em função do ângulo do eixo e integrada usando o método de Runge-Kutta. Os resultados da simulação mostram que a eficiência isoentropica foi melhorada em 7,4% e a temperatura de descarga foi reduzida em 23° C. A influencia da temperatura da água de resfriamento, dimensões da estrutura de resfriamento, folgas com vazamentos, velocidade angular e taxa de compressão puderam ser discutidos. Contudo, o compressor foi estudado isoladamente e não em conjunto com o restante do sistema de refrigeração.

Um estudo computacional sobre a transferência de calor em uma câmara de um compressor de válvula rotativa foi desenvolvido por Tan e Ooi, 2011. O modelo utiliza correlações empíricas de transferência de calor. A comparação dos resultados simulados com dados experimentais mostrou uma discrepância de apenas 1,8%. Concluiu-se que o processo claramente não é adiabático.

### 2.2.3 Sistemas com células a combustível

Um processo de gaseificação de biomassa integrado a uma turbina e uma célula a combustível de óxido sólido foi modelado no *software* ASPEN PLUS por Sadhukhan *et al.* (2010). Várias estratégias de integração diferentes foram simuladas com o objetivo de se estabelecer a maior recuperação de calor residual, aproveitamento de material e geração de energia possível. Concluiu-se que o sistema com célula a combustível é duas vezes mais potente que o combinado com turbina. Como a modelagem é do processo e não dos equipamentos, a eficiência de cada equipamento é atribuída individualmente e não calculada, o que seria mais realista.

Em outros trabalhos sobre células a combustível, o *software* HYSYS foi utilizado por Arteaga-Perez *et al.* (2009) e por Mulia-Soto e Flores-Tlacuahuac (2011) para investigação de processo de destilação de bio-etanol e células a

combustível de óxido sólido alimentadas também por bio-etanol, respectivamente. Foi localizado um ótimo local referente à densidade de corrente. Ficou pendente uma otimização global.

#### 2.2.4 Sistemas com trocadores de calor

Outro tipo de equipamento comumente modelado são os trocadores de calor. Desta forma, trocadores de calor reversíveis de uma unidade de separação de ar foram simuladas com programa próprio por Boehme *et al.* (2003). A unidade usava nove correntes de fluidos em fluxo paralelo e contracorrente. O método empregado dividiu o trocador de calor em seções. Em cada seção as propriedades do fluido, capacidades térmicas e coeficientes de troca térmica foram considerados constantes. Foram considerados fluxos monofásicos assim como bifásicos. Em cada seção foi calculada a média logarítmica de temperatura. Foi observado que para um número de seções maior que 40, o resultado permanece praticamente inalterado. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais com boa concordância. Uma otimização não foi realizada, apesar de o modelo apresentar tempo computacional suficientemente pequeno para isto.

A simulação termodinâmica da recuperação de calor de um secador de máquina de papel foi feita por Sivill, Athtila e Taimisto (2005) usando o *software* MATLAB. O modelo construído utilizava volumes de controle e gerou um sistema de equações algébricas. Os efeitos das mudanças das condições de operação foram estudados para melhorar a performance da recuperação de calor e seu posterior reuso para aquecimento de ar e água do processo. Foi realizada uma análise paramétrica, mas não uma otimização.

Em outro trabalho, um modelo de simulação geral de previsão de performance de trocadores de calor do tipo tubo e aleta com configuração complexa do circuito foi proposto por Ding *et al.* (2011). O modelo funciona com diferentes

fluidos com ou sem mudança de fase. O trocador de calor foi dividido em elementos e foram usadas correlações empíricas para cálculo de perda de carga e coeficientes de convecção. O modelo pode trabalhar com diferentes configurações de circuito de fluidos e foi programado com a linguagem C++. O programa inclui uma interface gráfica. Os resultados foram comparados com dados experimentais obtendo boa concordância. Contudo, poderia ter sido incluída uma rotina para otimizar o trocador de calor em estudo.

Outra simulação de trocador de calor, desta vez enterrado no subsolo, baseada em modelo de resistência e capacidade térmica foi realizada por Pasquier e Marcotte (2012) com o uso do *software* MATLAB. O tempo de processamento para 3000 interações no método de Runge-Kutta em um computador de mesa levou menos de um segundo. O modelo é restrito a poços verticais infinitos, não leva em conta o escoamento de fluido dentro dos tubos e nem a variação do coeficiente de convecção interno.

Posteriormente, Zarrella e De Carli, (2013), apresentaram um modelo para analisar o comportamento térmico de trocadores de calor helicoidais verticais enterrados. O trocador e a região do solo ao seu redor foram divididos em fatias e cada fatia em várias regiões anulares. Os nós térmicos foram ligados na direção axial e radial. O modelo considera a radiação solar e as interações com a atmosfera. Foi feita uma validação experimental com dados levantados em Erlangen, Alemanha. O autor informa que o modelo mantém um tempo computacional aceitável, contudo, o texto não informa quanto tempo é necessário para rodar o modelo. O estudo poderia ter levado em conta os outros equipamentos da instalação e não somente o trocador de calor e desta forma otimizar globalmente todo o conjunto.

Quanto a trocadores de calor automotivos, Horst *et al.* (2013) criou um modelo dinâmico de trocador de calor para previsão de performance e projeto de sistema de controle de um sistema de recuperação de calor residual automotivo aplicado aos carros da BMW. O trocador de calor foi dividido em três zonas. O modelo foi validado em duas fases. Uma fase em regime transiente e outra em regime permanente. O sistema respondeu aos distúrbios típicos das variáveis de entrada em boa concordância com os valores medidos na bancada de teste. O

modelo tratou o trocador isoladamente, desta forma não foi possível uma otimização global do automóvel.

#### 2.2.5 Sistemas em edifícios

O método zonal utilizado no desenvolvimento de um modelo numérico simplificado foi reportado por Haghghat *et al.* (2001) chamado de modelo zonal pressurizado com difusor de ar, o qual é capaz de prever o padrão térmico e de distribuição de fluxo de ar dentro de uma sala. Equações características do jato de ar foram introduzidas no modelo para generalizar sua aplicação à ventilação de prédios. Houve uma boa concordância dos resultados deste modelo quando comparado com simulações em DFC (Dinâmica de Fluidos Computacional) e com dados experimentais. O método trabalhou com uma malha esparsa e mesmo assim apresentou estabilidade numérica e bons resultados, a menos dos campos de velocidade, os quais apresentaram discrepâncias. Ainda, o modelo trabalhou apenas com meios homogêneos o que dificultou a aplicação em sistemas mais complexos nos quais existem sólidos e fluidos interagindo entre si.

Ainda nos métodos zonais, Lou *et al.* (2012), investigaram o uso de fachadas duplas de edifícios altos. O modelo criado com base no método zonal foi aplicado ao espaço entre os dois vidros. Os resultados da distribuição de pressão computada comparada aos dados experimentais obtidos em túnel de vento mostraram boa concordância. Também foi feita uma comparação com dados de saída de DFC e concluiu-se que o método zonal é uma boa alternativa ao túnel de vento e mesmo às técnicas de DFC. Apesar de não ter sido apresentada uma análise paramétrica ou otimização, o modelo é capaz de fazê-lo.

### 2.2.6 Outros sistemas

Em aplicações da indústria de açúcar, Jorge *et al.* (2010) simularam e analisaram um sistema de evaporação de caldo de cana usando o *software* HYSYS. A representação de evaporadores foi feita por combinação de trocadores de calor e vasos de separação de fases. Os resultados foram comparados com dados experimentais. A natureza do modelo não permite estudar a influência da geometria dos equipamentos sobre o comportamento do processo.

O grande número de aplicações de caldeiras motivou Gutiérrez Ortiz (2011) a construir um modelo dinâmico de caldeira flamotubular que foi resolvido com o uso do *software* MATLAB. O modelo foi desenvolvido com base nos princípios de conservação de massa, energia e momento. Foram considerados o corpo principal da caldeira, economizador, superaquecedor e recuperador de calor os quais foram divididos em volumes de controle. Os resultados apresentaram boa concordância com a literatura, apesar disto, uma otimização não foi realizada.

## 2.3 MODELAGEM DE ORDEM ALTA

Assim como no caso dos modelos ordem baixa, estes trabalhos aqui apresentados visam ilustrar aplicações de modelagens de ordem alta. Lembrando que estes são apenas alguns exemplos, e que a literatura oferece muitas publicações que poderiam ser listadas aqui. Mas, sendo o objetivo exemplificar as vantagens e desvantagens dos métodos, esta quantidade se mostra adequada. Os trabalhos escolhidos tratam de modelagem de fenômenos em pequena escala ou no máximo de um único equipamento e nunca de um sistema que integra vários equipamentos diferentes. Com fins de organização, os trabalhos foram agrupados em função do tipo de sistema modelado. Desta forma, foram separados em sistemas



com trocadores de calor, sistemas da indústria alimentícia, sistemas envolvendo hidrogênio, sistemas de transferência de calor, sistemas com reações químicas, sistemas de geração de energia elétrica e, outros sistemas que não se enquadram nos grupos anteriores.

### 2.3.1 Sistemas com trocadores de calor

Zarrinehkafsh e Sadrameli (2004) simularam um trocador de calor regenerador de leito fixo por meio de um modelo resolvido pelo método de diferenças finitas. O sistema de equações resultante foi resolvido pelo método de Crank-Nicolson. A maioria dos modelos matemáticos assumem que a resistência térmica interna do fluxo de calor dentro do núcleo é desprezível, ou que esta resistência pode ser incorporada ao coeficiente global de transferência de calor na superfície. Este modelo tridimensional analisou os dois casos. O modelo estudou somente o regenerador, portanto, foi impossível um estudo paramétrico envolvendo os demais equipamentos do sistema.

A seguir, o *software* FLUENT foi usado para estudar trocadores de calor de alta performance em circuitos impressos por Tsuzuki, Kato e Ishiduka (2007). A malha foi gerada pelo *software* GAMBIT. A modelagem usou o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  e o algoritmo SIMPLE para acoplar pressão e velocidade. O modelo convergiu em 3000 interações demorando um dia e meio. A complexidade do modelo e a conseqüente grande carga computacional tornaram proibitivo um processo de otimização.

Ainda na tecnologia de trocadores de calor, Zang *et al.* (2009) realizaram uma simulação tridimensional de um trocador de calor casco e tubo equipado com chicanas helicoidais e contínuas comparando ambas as configurações. A malha foi gerada no *software* GAMBIT. Testes de independência de malha foram feitos com três malhas diferentes chegando a 5,3 milhões de elementos. O *software* usado foi o

FLUENT que tomou 72 horas para realizar toda a simulação num computador DELL Quad-Core. Os resultados obtiveram concordância qualitativa com dados da literatura. A alta carga computacional pode inviabilizar um processo de otimização.

Na tecnologia de trocadores de calor enterrados, a simulação numérica da transferência de calor e de água do subsolo para um sistema de bomba de calor foi feita por Nam e Ooka (2010). Nesta pesquisa, um modelo tridimensional de transferência de calor foi comparado com experimentos em escala real validando os resultados computacionais. O método numérico que resolveu o modelo se baseou em elementos finitos e foi usado o *software* específico para estudos de águas subterrâneas e escoamentos em meios porosos chamado FEFLOW. Trabalhos futuros de otimização poderão ser conduzidos utilizando um modelo de carga térmica do prédio.

Num último trabalho sobre trocadores de calor, a simulação das características de transferência de calor num tubo conformado em espiral cônica foi investigada por Ke *et al.* (2011). Diferentes malhas foram geradas e os resultados da simulação comparados com dados experimentais obtendo diferenças de menos de 5%. O escoamento laminar foi analisado pelo software FLUENT o qual acoplou pressão e velocidade através do algoritmo SIMPLEC. A discretização usada foi UPWIND de segunda ordem. Os resultados são precisos, mas referem-se a apenas um componente de um equipamento e a fenômenos localizados.

### 2.3.2 Sistemas da indústria alimentícia

Na área de alimentos, Su e Li (2003) realizaram uma simulação teórica do resfriamento a vácuo de alimentos esféricos. O modelo resolvido pelo método de diferenças finitas foi desenvolvido para prever a massa e a temperatura em função do tempo de alimentos esféricos durante o resfriamento a vácuo. Este artigo discutiu os efeitos das propriedades termofísicas, coeficientes de transferência de calor por

convecção, calor latente de evaporação assim como os parâmetros do ambiente em vácuo que governam a transferência de calor e massa do produto. Tendência temporal da pressão do sistema, temperatura do produto na superfície, no centro, média e massa foram previstas com programa de computador escrito especialmente. O modelo descreveu os fenômenos isolados e não considerou os demais equipamentos do processo.

Na estocagem de alimentos, uma simulação DFC levando em conta o fluxo do ar, transferência de calor (convecção, condução e radiação) e transferência de massa (evaporação e condensação de água) de um refrigerador doméstico foi feita por Laguerre, Benamara e Flick (2010). Foi apresentado o campo de temperatura, velocidade e umidade do gabinete do refrigerador ocupado por alimentos. Os resultados foram comparados com dados experimentais. Não foram feitos estudos sobre transferência de calor transiente.

Na engenharia de alimentos, uma simulação DFC de transferência de calor para misturas de alimentos sólidos e líquidos dentro de latas em processos de pasteurização foi conduzida por Kiziltas *et al.* (2010). O modelo foi desenvolvido em duas dimensões e resolvido pelo software ANSYS. A malha é bidimensional com simetria axial e contou com mais de 60.000 nós. Foi usada o algoritmo TDMA para resolver velocidades e temperaturas e o PCGM (método do gradiente pré-condicionado conjugado) para resolver as mudanças de pressão. A mudança de uma geometria 2D para 3D não afetou os resultados significativamente. Os resultados foram validados com dados experimentais. Foi concluído que otimizações ainda não foram reportadas em função da grande carga computacional que isso representa, o que tornou o processo proibitivo.

Ainda na engenharia de alimentos, Mondal e Datta (2010) apresentaram um modelo bidimensional do processo de produção de pão sem casca. As equações de transferência de calor e massa foram usadas simultaneamente. O software COMSOL foi alimentado com uma malha de 751 elementos triangulares. O modelo foi capaz de prever o campo de temperatura e umidade dentro do alimento. O software CONSOL foi escolhido em lugar do FLUENT por se basear no método de elementos finitos e trabalhar melhor em transferência de calor e massa em meios porosos. CONSOL pode usar a lei de Darcy e então não é necessário resolver a

equação de Navier-Stokes, o que é mais complicado. Os autores informaram que o modelo pode ser utilizado em otimização, mas esta não foi apresentada no trabalho.

Como último trabalho sobre engenharia de alimentos, um modelo tridimensional de transferência de calor e massa transiente para análise do processo de secagem de fatias de papaia foi proposto por Lemus-Mondaca *et al.* (2013). O modelo resultou em equações diferenciais parciais não lineares que foi resolvido pelo método de volumes finitos com uma discretização implícita. Um programa em Fortran foi escrito especialmente para a modelagem. Malhas de  $40^3$ ,  $60^3$  e  $80^3$  nós foram testadas. A simulação foi realizada num computador Intel Core 2 Duo T5750/2.0GHz com 3.0 GB de RAM obtendo tempos computacionais razoáveis. A diferença entre os resultados da simulação e dados experimentais foi menos de 9,5%. Somente os fenômenos locais foram estudados. O processo e demais equipamentos não foram considerados.

### 2.3.3 Sistemas envolvendo hidrogênio

Em outra área de interesse que é a tecnologia voltada ao hidrogênio, Askri *et al.* (2009) modelaram e otimizaram um tanque de estocagem de hidrogênio do tipo metal-hidreto. Foi apresentado um modelo bidimensional que foi validado com resultados experimentais. O modelo dinâmico foi estudado em quatro configurações: (i) tanque cilíndrico, (ii) tanque com aletas externas, (iii) tanque cilíndrico com tubo concêntrico com fluido refrigerante e, (iv) tanque cilíndrico com tubo concêntrico com fluido refrigerante aletado. O método híbrido de elementos finitos e volumes de controle discretizou o sistema de equações diferenciais parciais. Um gerador de malha não estruturada e um programa para resolver o sistema de equações algébricas resultante foram escritos em FORTRAN 90. O tanque otimizado obteve tempo de carregamento até 80% menor.

Em outra tecnologia de armazenamento, a transferência de calor e massa em um tanque de carvão ativado para armazenamento de hidrogênio em estado criogênico foi simulado por Xiao *et al.* (2010). O modelo possui simetria axial e foi resolvido no software FLUENT. O modelo de Dubinin-Astakhov para absorção em microporos foi usado para descrever o processo de absorção do hidrogênio pelo carvão ativado. Foram estudadas três situações de carregamento diferentes. A complexidade do modelo dificultou uma análise paramétrica e otimização.

No ano seguinte, um estudo experimental e numérico de um motor a hidrogênio de ignição por faísca foi conduzido por Rakopoulos *et al.* (2011). Foi desenvolvido um programa DFC próprio para simular o domínio tridimensional dos fenômenos que ocorrem dentro do cilindro usando um esquema de volumes finitos em uma malha de  $40^3$  elementos. O código desenvolvido incorpora o modelo de turbulência RNG  $\kappa$ - $\epsilon$ . Os resultados foram validados com dados experimentais. Atenção especial foi dada às emissões de NO. A correção de pressão usada foi do algoritmo PISO (*Pressure Implicit with Split Operator*). Mesmo com todos os cuidados tomados para que o tempo computacional permanecesse baixo, apenas um caso (conjunto de parâmetros) pode ser apresentado o que demonstra a dificuldade em realizar uma análise de vários conjuntos de parâmetros de operação e projeto.

Quanto à geração de hidrogênio, o método de elementos finitos foi utilizado por Bulfin *et al.* (2012) para resolver o fluxo de calor num leito fixo aletado de reator solar redox de geração de hidrogênio. As simulações utilizaram uma malha triangular bidimensional. A solução foi linear entre os elementos e computada com métodos iterativos. As referências citam o *software* COMSOL. O modelo trata apenas de um componente que poderia ser conectado a um sistema e, então, uma busca de ponto ótimo conduzida.

### 2.3.4 Sistemas de transferência de calor

No desenvolvimento na área de transferência de calor, Lin *et al.* (2005) realizaram um estudo numérico sobre tubos de calor em sistemas de recuperação de calor. Foi apresentada a simulação de um processo de desumidificação utilizando trocadores de calor associadas a tubos de calor. A simulação usou técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacional com o software FLOTHERM. O método pode fornecer bons resultados e prever o comportamento do sistema, contudo, não foi explorado o espaço de projeto em busca do ótimos locais ou globais.

Nos problemas de transferência de calor, Guo e Dai (2010) conduziram uma simulação de escoamento e transferência de calor em um leito empacotado aleatoriamente usando DFC. O leito era composto de 120 esferas aleatoriamente dispostas. A equação de Navier-Stokes foi resolvida para um domínio tridimensional com uma formulação de volumes finitos baseada na técnica de geração de malha Chimera. Esta técnica foi escolhida por representar as esferas e vazios em malhas separadas. Em outros trabalhos citados pelos autores, malhas de alta qualidade com 47 milhões de elementos foram abandonadas por exceder a capacidade computacional (NIJEMEILAND e DIXON, 2004). Foi discutida a não uniformidade de fluxos e de transferência de calor em função da fração de espaço vazio. O modelo não considerou outros equipamentos envolvidos num processo como um todo.

Também em transferência de calor, Steinboeck *et al.* (2011) apresentou um método para solucionar o problema de valor de contorno do campo de temperatura em um domínio unidimensional de um sólido com parâmetros de material não lineares considerando radiação. A transformação dos valores de temperatura permite isolar as características não lineares do material em um coeficiente simples da equação de condução de calor. O método de Galerkin foi utilizado para a discretização espacial do problema em 100 elementos e a integração no domínio do tempo foi feita restringindo os fluxos de calor no contorno por partes e em sinais descontínuos. A troca de calor por radiação foi computada com o auxílio da lei de Stefan-Boltzmann com a temperatura ambiente servindo como entrada do sistema. A viabilidade e precisão do modelo foram demonstradas por meio de um tratamento

térmico em uma chapa de aço e comparadas com o método de diferenças finitas. O tempo computacional do método de elementos finitos chegou a ser dez vezes menor que o método de diferenças finitas usando MatLab. Uma otimização não foi realizada, pois o modelo não está conectado ao restante de um sistema, isto é, são considerados apenas fenômenos isolados.

Num último trabalho sobre transferência de calor, Terreros *et al.* (2013) descreveram um método rápido e eficiente para simular transferência de calor tridimensional em um material contínuo usando o método de elementos discretos. Este método é usado para calcular tensões e deslocamentos em um volume contendo um grande número de partículas, tal como grãos de areia. O material foi modelado com elementos esféricos discretos de diferentes tamanhos com o objetivo de se obter um domínio compacto e isotrópico adequado a simulações mecânicas e térmicas acopladas. Este modelo é adequado a processos industriais nos quais existem grandes deslocamentos e deformações da malha. Os resultados foram comparados com uma simulação de elementos finitos no *software* Abaqus obtendo boa concordância. Possíveis aplicações em otimização e controle podem ser feitas acoplando-se o método a modelos de sistemas de engenharia completos.

### 2.3.5 Sistemas com reações químicas

Na área de reações químicas, a pirólise e gaseificação de biomassa foram estudadas por Babu e Chaurasia (2004a e 2004b). A descrição dos processos químicos da pirólise foram acoplados a um modelo de fenômenos de transporte variável, unidimensional e em regime transiente. O modelo inclui convecção, condução, radiação e difusão de quantidade de movimento. Um esquema de discretização de diferenças finitas implícito foi utilizado juntamente com um algoritmo para matrizes tridiagonais. Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e não existe restrição ao tamanho do passo de tempo. O método de Runge-Kutta de quarta ordem com passo fixo resolveu as equações cinéticas das reações químicas.

Também foi testada a integração com Runge-Kutta de passo adaptativo. Foram investigadas as influências do tamanho das partículas, forma, distribuição do produto, tempo de conversão e calor de reação sobre a performance do sistema, contudo não foi realizada uma otimização.

Ainda na área de reações, Guihua, Honggang e Feng (2011) simularam uma fornalha de craqueamento de etileno com DFC. Escoamento, combustão, transferência de calor por radiação e craqueamento térmico foram modelados de forma acoplada. Foi usado o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  juntamente com o modelo para combustão não pré-misturada com taxa finita e dissipação em turbilhão. A simulação, processada pelo *software* FLUENT, mostrou os campos de velocidade, temperatura e concentração. O *software* GAMBIT gerou a malha de 340.000 células. A equação de Navier-Stokes foi resolvida pelo algoritmo SIMPLE. Contudo, o grande número de elementos na malha tornou uma otimização inviável.

### 2.3.6 Sistemas de geração de energia elétrica

Em aplicações de geração de energia elétrica, a simulação tridimensional de transferência de calor de um receptor solar imerso foi desenvolvida por Xiang *et al.* (2012). Devido ao sobreaquecimento de concentradores fotovoltaicos densamente empacotados estes tem sido imersos em fluidos refrigerantes. O campo de velocidade e temperatura foi obtido. Os parâmetros geométricos foram investigados. A malha gerada continha mais de 3 milhões de elementos hexaédricos. Foi usado o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\varepsilon$  e equação de Navier-Stokes foi resolvida pelo algoritmo SIMPLE. A diferença máxima entre os resultados da simulação e os dados experimentais foi de 13%. Contudo, o tempo computacional para resolver uma malha de 3 milhões de elementos tornou proibitiva uma otimização.

Ainda em geração de energia, a caracterização da transferência de calor de um tubo receptor preenchido com sal fundido de uma usina solar foi realizada por



Yang *et al.* (2012). O *software* de DFC FLUENT e o gerador de malhas GAMBIT foram usados. O modelo de turbulência usado foi o  $\kappa$ - $\epsilon$  e o algoritmo SIMPLE acoplou pressão e velocidade. Concluiu-se que o fluxo de calor aumenta com o aumento da velocidade do sal fundido. Os demais equipamentos do sistema da usina não foram considerados.

### 2.3.7 Outros sistemas

Na área de células a combustível de óxido sólido (SOFC), uma célula foi simulada por Mauro *et al.* (2011) usando um modelo resolvido pelo método de elementos finitos. Os fenômenos de transferência de calor e massa foram acoplados com as reações eletroquímicas. Foi gerada uma malha de 622401 elementos tetraédricos. O método pode ser paralelizado. O modelo capturou o comportamento da célula, contudo uma otimização ficou comprometida devido ao grande número de elementos da malha.

Num estudo de fenômenos isolados, Oon *et al.* (2012) simularam o efeito de uma expansão subita num fluxo de ar em tubo anular via DFC utilizando o *software* FLUENT com o esquema de volumes finitos. Os resultados foram comparados com dados experimentais. Foi investigada a transferência de calor durante a expansão. O *software* GAMBIT gerou a malha de 920 elementos. O modelo de turbulência usado foi o  $\kappa$ - $\epsilon$  e o algoritmo SIMPLE acoplou pressão e velocidade. Foi concluído que a temperatura mínima da superfície encontra-se no ponto onde o fluxo adere novamente ao tubo. Foi estudado apenas um fenômeno isolado.

## 2.4 APLICAÇÕES EM ENGENHARIA DE SISTEMAS

Discutidos os métodos de modelagem matemática mais utilizados em engenharia de sistemas, selecionou-se para estudo nesta Tese três exemplos característicos. Trata-se de um sistema de acondicionamento de um conversor de potência eletrônico do tipo PEBB (*Power Electronics Building Block*) de 11 kW, um navio inteiramente elétrico virtual e um fotobiorreator compacto para produção de microalgas utilizadas na fabricação de biodiesel. Assim, apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica pertinente para cada um desses sistemas.

### 2.4.1 Acondicionamento de eletrônicos PEBB

Modelos térmicos confiáveis são fundamentais para a concepção de acondicionamento de eletrônicos, de modo que o gerenciamento térmico poderia ser otimizado para máxima eficiência global do sistema. Como dispositivos eletrônicos integrados para controle, potência e sistemas de propulsão dissipam quantidades consideráveis de calor, o desempenho do acondicionamento de eletrônicos, tipo PEBB, é fortemente dependente de grandes transientes térmicos. O gerenciamento térmico inadequado geralmente resulta em falha térmica de dispositivos eletrônicos, levando à falha do sistema como um todo. Assim, as estratégias de gerenciamento térmico ao nível de componente devem ser desenvolvidas a fim de satisfazer as necessidades de refrigeração e evitar possíveis falhas no sistema.

Tensões termomecânicas são conhecidas por danificar equipamentos eletrônicos, e só podem ser acessadas através do conhecimento do campo de temperatura do equipamento. Portanto metodologias para antever a necessidade de reparo ou substituição significativamente antes da falha são necessárias, e várias abordagens têm sido propostas com uso do método dos elementos finitos (MEF).

Deste modo é possível calcular o dano de antemão em eletrônicos submetidos a cargas cíclicas e termomecânicas (LALL *et al.*, 2006; GNANASAMBANDAM *et al.*, 2005). Bagnoli *et al.* (2011) propôs uma solução térmica analítica para substituir os programas baseados no oneroso MEF, mas a estratégia é aplicável apenas em estado estacionário em estruturas virtuais de duas camadas. Yang e Chen (2011) conduziram uma investigação experimental para testar o comportamento dinâmico da integridade de acondicionamento de eletrônicos, mas consideraram modos fixos para projeto e avaliação de confiabilidade. Foi enfatizada a necessidade de modelos matemáticos precisos e de baixo tempo computacional. A principal mensagem de todos estes estudos é que a comunidade de sistemas de acondicionamento de eletrônicos tem uma grande necessidade de reduzir o tamanho das suas simulações de transferência de calor.

A resposta térmica de sistemas foi investigada por meio de modelos físicos simplificados em estudos prévios (VARGAS *et al.*, 2001; ORDONEZ *et al.*, 2008; DIAS *et al.*, 2009, VARGAS *et al.*, 2012; DILAY *et al.*, 2013) em pacotes eletrônicos e navios inteiramente elétricos. O modelo combina princípios de termodinâmica clássica e transferência de calor resultando em um sistema tridimensional de equações diferenciais as quais são discretizadas no espaço usando um esquema de volumes finitos com células centradas fazendo uso de correlações empíricas e analíticas disponíveis para calcular as grandezas físicas requeridas, tais como coeficientes de fricção e de transferência de calor, e outras quando necessário. Uma vez conseguido o objetivo da solução do gerenciamento térmico e elétrico, uma ferramenta confiável de visualização foi desenvolvida (VISIT, 2008; SOUZA; 2010). Dessa forma, uma visualização da disposição dos sistemas críticos integrados possibilitou a adaptação rápida do projeto.

A revisão bibliográfica aponta para a necessidade de modelos suficientemente precisos e ao mesmo tempo computacionalmente rápidos para acondicionamento de eletrônicos.

#### 2.4.2 Navio inteiramente elétrico virtual

O desenvolvimento da pesquisa de um navio inteiramente elétrico requer a avaliação da resposta térmica e elétrica dos sistemas integrados em tempo aceitável. Portanto, uma ferramenta de simulação, que é capaz de fornecer respostas rápidas durante os estágios iniciais da concepção do navio é necessária. Desta forma, a viabilidade térmica dos futuros navios inteiramente elétricos da Marinha dos Estados Unidos da América pode ser demonstrada por meio de modelagem e simulação a nível de sistema. Para isso, é necessário o desenvolvimento de modelos eletro-termo-mecânicos capazes de abordar a natureza transitória do problema. Metodologias atuais para a otimização termodinâmica de sistemas complexos são experimentalmente e computacionalmente caras. Um exemplo ilustrativo é a aplicação de métodos numéricos em equações diferenciais parciais de conservação em diversos fenômenos, tais como em sistemas de energia integrados complexos, o que conduz a elevados custos e tempo de processamento, mesmo para a simulação dos poucos casos selecionados e opõe-se, portanto, essencialmente, a possibilidade de um estudo de otimização (VARGAS *et al.*, 2012).

O navio inteiramente elétrico é exemplo de engenharia de sistemas onde se espera o uso mais eficiente possível da energia a bordo para se reduzir o consumo de combustível. Também se espera que esta tecnologia ajude a atender às necessidades futuras de armas de alta potência, como a arma eletromagnética, microondas de alta potência e lasers de alta energia. O Escritório de Pesquisa Naval (ONR) da Marinha dos EUA criou cinco "áreas foco" para o desenvolvimento do navio inteiramente elétrico. São elas, como relatado por Wagner (2007), a geração de energia, distribuição e controle, armazenamento de energia, transferência de calor e gerenciamento térmico, e motores e atuadores. As cinco áreas são altamente interdependentes e devem operar sincronizadamente para um bom funcionamento. A geração de calor está presente em todas elas, em níveis diferentes, como por exemplo, do resultado da operação de lançamento eletromagnético (SMITH *et al.*, 2005), de propulsão (KAVERNA e HANSEN, 2009), e em todos os outros sistemas do navio. Portanto, um gerenciamento térmico pobre poderia, eventualmente,

prejudicar o desempenho e até levar a falhas de sistemas eletromecânicos em detrimento da missão de combate do navio (SOMAN *et al.*, 2009).

#### 2.4.3 Fotobiorreator

As microalgas são microrganismos algais com clorofila-*a* e outros pigmentos fotossintéticos, os quais têm facilidade de realizar a fotossíntese oxigênica. Uma das potenciais aplicações mais importantes das microalgas é a energética, uma vez que podem gerar energia de diferentes formas, tais como: queima da biomassa, hidrogênio, biodiesel e biogás. A atenção das indústrias tem se voltado cada vez mais para o ramo de biodiesel derivado de microalgas, pois além de ecologicamente correto, as algas têm um potencial maior do que as culturas tradicionais (oleaginosas), oferecendo um rendimento satisfatório em curto espaço de tempo.

Com base na extrapolação de dados laboratoriais, as microalgas têm potencial para produção de cerca de 70 toneladas de biomassa por hectare/ano (de onde é extraído o biodiesel), enquanto a soja produz em média apenas 3 toneladas de biomassa por hectare/ano (XU; MIAO; WU, 2006). No entanto, a biomassa de microalgas não está disponível em quantidade suficiente no ambiente natural para ser efetivamente utilizada. Desta forma diferentemente do que ocorre em outras atividades (extrativismo vegetal, pesca, caça, etc.), no caso de microalgas é necessário coletar os organismos na natureza e cultivá-los para torná-los utilizáveis. Neste sentido, os cultivos são as ferramentas que viabilizam o aproveitamento das microalgas pelo homem (LOURENÇO, 2006).

As microalgas podem ser produzidas em fotobiorreatores (FBR) que são sistemas fechados utilizados para o desenvolvimento de reações fotossintéticas, baseando-se em processos naturais em que o metabolismo fotossintético dos microrganismos converte energia solar, e CO<sub>2</sub> em produtos como oxigênio, hidrogênio, lipídios, carboidratos e proteínas (CONTRERAS *et al.*, 1999).

Consequentemente, estes processos necessitam de sistemas de iluminação, trocadores de gases (adição de CO<sub>2</sub> e remoção de O<sub>2</sub>), adição de nutrientes e controle de temperatura (RORRER; CHENEY, 2004).

Os fotobiorreatores fechados oferecem uma ótima estrutura, pois são caracterizados por elevada eficiência fotossintética associada a um preciso controle das variáveis operacionais, com destaque para um menor risco de contaminação, e permitem a manutenção de um ambiente físico-químico estável com controle de evaporação, pH, e nutrientes (PAPÁCEK *et al.*, 2003; KUNJAPUR; ELDRIDGE, 2010; MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; MORWEISER *et al.*, 2010). Por outro lado, a construção dos FBRs fechados apresenta custos mais elevados do que lagoas de cultivo, por exemplo, uma vez que necessitam de materiais transparentes, são mais complexos operacionalmente e são de difícil escalonamento (LOPES, 2007).

Além disso, FBRs para cultivo de microalgas podem ser instalados em terras degradadas ou até mesmo em desertos, bastando apenas que haja luz, nutrientes, gás carbônico e água, que pode ser até mesmo salgada ou imprópria para consumo humano ou animal. Segundo Kurano *et al.* (1995), as microalgas podem ser cultivadas em FBRs acoplados a saídas de CO<sub>2</sub> representando assim uma alternativa efetiva para a diminuição do “efeito estufa”. A fixação biológica de gás carbônico a partir de organismos fotossintéticos como as microalgas em FBRs é considerada uma alternativa frente aos processos convencionais de tratamento. Isto se dá devido à elevada capacidade de remoção de dióxido de carbono pelas microalgas.

Cultivar microalgas como matéria-prima para a obtenção de biocombustíveis pode ser a solução para todas estas questões apresentadas acima. Elas surgem como um recurso viável para o biodiesel e biogás. Segundo Chisti (2007) algumas microalgas chegam a ter 70% de lipídio em sua estrutura e são capazes de produzir mais de 30 vezes a quantidade de óleo (por ano e por unidade de área de terra) quando comparada com as culturas de oleaginosas. Isto se deve ao fato de terem a duplicação da biomassa em intervalo de tempo muito curto, a utilização de um espaço físico menor, a capacidade de serem cultivadas em zonas não apropriadas para a agricultura e a menor geração de resíduo (LOURENÇO, 2006).

Reconhecendo essa demanda, o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS/UFPR) tem buscado investir em várias frentes. As pesquisas incluem: seleção de cepas de microalgas com alto teor de lipídios; melhoramento do meio de cultivo; utilização de águas degradadas para o cultivo, e a reutilização do meio de cultivo; novas geometrias compactas de fotobiorreatores tubulares (horizontais e verticais), análise de cinética de crescimento em escala de bancada, piloto e industrial; projeto e modelagem matemática do fotobiorreator tubular compacto; desenvolvimento de processo de extração de óleo da biomassa microalgal e produção de biodiesel a partir de óleo de microalgas.

Fatores como temperatura, radiação solar, pH e a composição de nutrientes do meio de cultivo influenciam diretamente na composição celular da microalga. Quando é possível controlar estas condições pela engenharia e arquitetura do FBR pode-se elevar a produção de biomassa microalgal. O pH, e a composição dos nutrientes no meio de cultivo podem ser controlados por meio de dispositivos instalados no fotobiorreator, mas a radiação solar e a temperatura ambiente são variáveis que dependem da localização do sistema.

O meio preparado para o cultivo influencia diretamente no crescimento celular microalgal, bem como na composição química da microalga. Os elementos nutritivos mais importantes são dióxido de carbono, nitrogênio, fósforo, magnésio e potássio. Microelementos como manganês e cobalto atuam favoravelmente em suas atividades vitais (LIMA *et al.*, 1999).

A troca de gases ocorre na coluna de gaseificação. Esta coluna deve ser eficiente no fornecimento de CO<sub>2</sub> e na remoção de O<sub>2</sub>, e deve evitar que as bolhas de gás passem para os tubos (CHISTI, 2008). A transferência gasosa depende principalmente do tempo de residência da fase gasosa, da área de transferência e do grau de mistura da fase líquida. A transferência pode ser melhorada utilizando misturadores estáticos, que, além de intensificarem a turbulência, aumentam o tempo de residência do gás no sistema e quebram as bolhas, aumentando a área de troca (RYU *et al.*, 2009).

Modelos matemáticos para a taxa de crescimento de microalgas foram apresentados por Tamiya *et al.* (1953), Van Oorshot (1955), Steele (1977),

Bannister (1979), Aiba (1982) e Molina Grima *et al.* (1994) levando em conta a disponibilidade de luz solar. Pérez *et al.* (2008) apresentaram um modelo que considera a temperatura do meio de produção.

Os modelos matemáticos utilizados em colunas de gaseificação devem ser capazes de prever as concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> na saída da coluna, para isso, devem também ser capazes de descrever essas concentrações em qualquer posição do interior da coluna. Apesar da importância das trocas gasosas em fotobiorreatores, existem poucos modelos que as descrevem, dos quais se destacam os modelos de Cornet *et al.* (1998), de Rubio *et al.* (1999), de Boyadjiev e Merchuk (2008), e Sugai (2012).

A revisão bibliográfica apresentou no contexto da produção de microalgas com fins bioenergéticos, o que são microalgas, os métodos mais utilizados para cultivo em larga escala e os fatores que afetam a produção. Estes fatores serão considerados na elaboração de um modelo matemático de fotobiorreator.

## 2.5 DESAFIOS

Com base na revisão bibliográfica realizada, foram identificados os seguintes desafios para o avanço no estado-da-arte em modelagem matemática para engenharia de sistemas:

- I. As modelagens simplificadas não permitem avaliar fenômenos físicos, químicos ou biológicos localmente. Esta limitação conceitual pode representar uma falha catastrófica no sistema real em estudo, apesar da velocidade destes modelos;
- II. Modelos de ordem baixa frequentemente não contemplam fenômenos importantes devido a linearizações;



- III. Resultados precisos fornecidos por modelos de ordem alta dificilmente podem ser utilizados em processos de otimização, pois estes modelos exigem uma grande carga computacional;
- IV. Normalmente campos de velocidade são calculados de fato, o que consome tempo computacional;
- V. Modelos de ordem alta podem modelar um único equipamento, mas não se mostram adequados quando aplicados em sistemas inteiros;
- VI. Não se detecta normalmente o uso intensivo de correlações empíricas de transferência de calor e massa disponíveis na literatura nos modelos de alta ordem;
- VII. Existe grande necessidade de modelos de ordem reduzida no campo de gerenciamento térmico de sistemas eletrônicos com resultados de precisão e ao mesmo tempo rápidos computacionalmente;
- VIII. Técnicas de ajuste ou identificação experimental e a redução de ordem ainda estão sendo desenvolvidas como meios para obtenção de modelos de ordem reduzida.

## 2.6 OBJETIVOS

### 2.6.1 Objetivo geral

Com base na revisão bibliográfica e nos desafios listados para a área de modelagem matemática e simulação aplicadas à engenharia de sistemas, define-se o objetivo geral desta tese. Trata-se de propor uma metodologia para a modelagem matemática e simulação para engenharia de sistemas visando aplicação em otimização, com potencial para uso em controle. A metodologia proposta deve

combinar metodologias existentes de forma a produzir um modelo de ordem reduzida, i.e., intermediário entre um modelo de ordem baixa e alta, mas mantendo precisão suficiente para uso como ferramenta de análise e projeto.

### 2.6.2 Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos a serem executados sequencialmente ou em paralelo são apresentados:

- I. Proposta de uma modelagem matemática de ordem reduzida como estratégia para simplificação dos equacionamentos matemáticos encontrados em engenharia de sistemas;
- II. Desenvolver modelos matemáticos para os sistemas: i) acondicionamento de eletrônicos tipo PEBB (*Power Electronic Building Block*); ii) gerenciamento térmico de navio inteiramente elétrico, e iii) fotobiorreator compacto;
- III. Desenvolver um gerador de malha para representar com precisão geometrias complexas (e.g., casco de um navio de grande porte);
- IV. Desenvolver um procedimento numérico para realizar a análise transiente ou em regime permanente em um mesmo aplicativo computacional;
- V. Ajustar e validar experimentalmente o modelo PEBB;
- VI. Realizar uma análise paramétrica do sistema PEBB e do navio inteiramente elétrico, utilizando o modelo PEBB ajustado e validado experimentalmente;
- VII. Avaliar a resposta térmica e de umidade relativa de um navio virtual inteiramente elétrico, e
- VIII. Comparar os resultados numéricos do modelo do fotobiorreator com resultados experimentais.

### 3 MODELO MATEMÁTICO

Para a modelagem de sistemas físicos, utilizou-se como metodologia o fluxograma apresentado na FIGURA 3.1. Trata-se do melhoramento de metodologia recomendada para a modelagem e simulação de sistemas dinâmicos (WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS *et al.*, 2001).

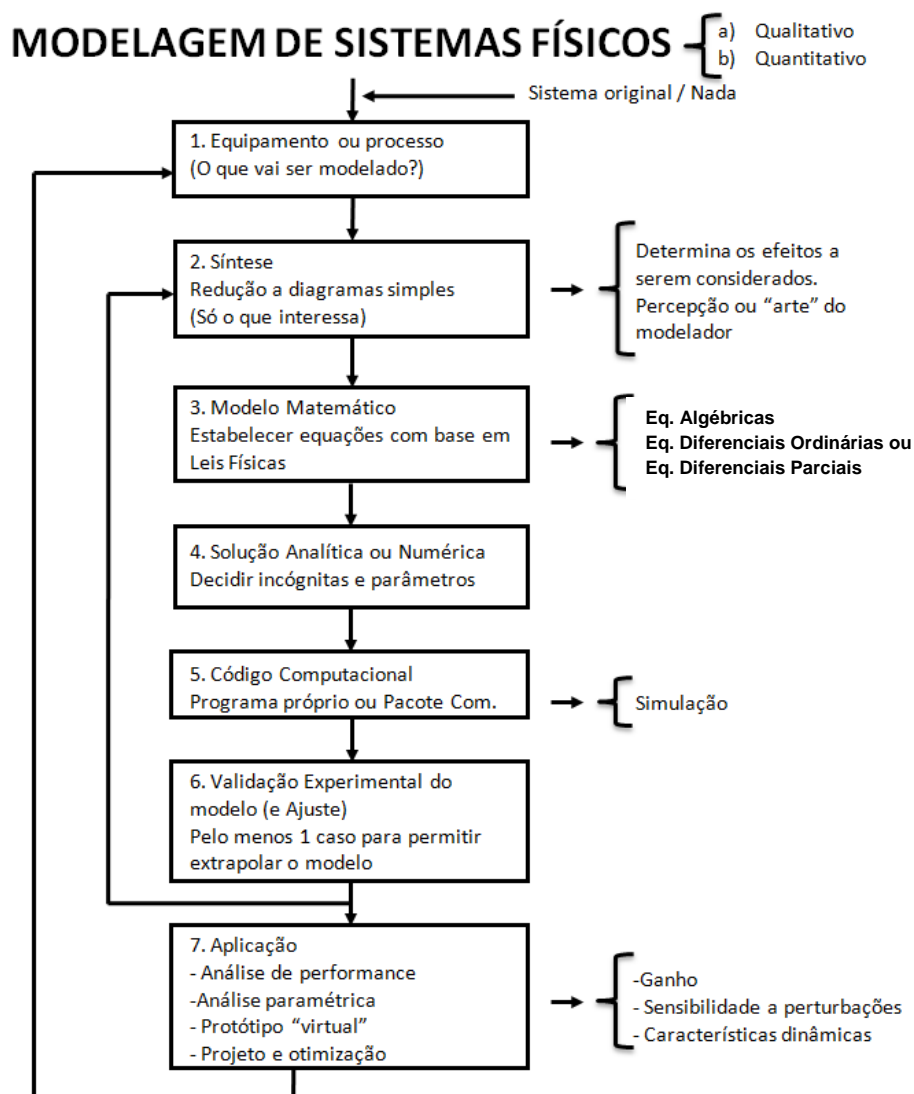


FIGURA 3.1. FLUXOGRAMA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FÍSICOS  
FONTE: WOODS; LAWRENCE, 1997; VARGAS *et al.*, 2001

Seguindo a metodologia da FIGURA 3.1, primeiramente escolhe-se o tipo de modelagem a adotar (quantitativa/ordem alta: dependência espacial e temporal ou

qualitativa/ordem baixa: dependência temporal apenas) e identifica-se o sistema físico que será estudado (existente ou hipotético) na etapa 1. Na etapa 2, é feita uma síntese, em que são adotadas hipóteses simplificadoras a fim de reduzir a um mínimo a complexidade matemática do modelo, porém sem deixar de captar os fenômenos físicos principais responsáveis pela ocorrência do processo ou funcionamento do equipamento. Na etapa 3, é desenvolvido um modelo matemático com base nas hipóteses adotadas. Nas etapas 4 e 5, decide-se sobre o método numérico para obter a solução das equações do modelo e o código computacional, que pode ser um programa computacional próprio, um aplicativo comercial ou gratuito (*open source*). A etapa 6 é a de ajuste e validação experimental do modelo, nesta ordem, que permite verificar a precisão dos resultados e, conseqüentemente, seu uso prático posterior como ferramenta de engenharia. A etapa 7 consiste da aplicação do modelo, verificando se o equipamento ou processo atende aos objetivos inicialmente propostos, tal que em caso negativo, o sistema seja repensado e um novo modelo seja escrito.

### 3.1 ANÁLISE

O problema consiste em computar a distribuição de uma grandeza qualquer dentro do sistema de engenharia em estudo (e.g., temperatura, umidade relativa, concentração de espécies). Estas distribuições são determinadas pelas condições do ambiente externo, fluxo de fluidos, geometria do sistema de engenharia, e termos de geração.

A combinação de um modelo físico simplificado com o esquema adotado de volumes finitos para a discretização das equações governantes do sistema é denominada de modelo de elementos de volume (MEV), conforme proposto por Vargas *et al.* (2001). As equações governantes são os princípios de conservação de massa, energia e espécies aplicados a cada elemento de volume.

A metodologia é resumida em três etapas principais:

1. DISCRETIZAÇÃO: dividir o domínio do sistema de engenharia em elementos de volume (volumes de controle) que são células de volumes finitos centradas (FLETCHER, 1991), que podem conter sólido, fluido, ou os dois como subsistemas no interior da célula. Assim, a dependência espacial real do sistema é incorporada ao modelo;
2. EQUACIONAMENTO: escrever uma equação diferencial ordinária (EDO) para calcular a grandeza de interesse no centro de cada volume. Por exemplo: i) no caso da temperatura, isso é feito através da primeira Lei da Termodinâmica (princípio de conservação de energia), e ii) para o cálculo de concentrações no centro de cada volume em uma mistura, o procedimento é análogo, estabelecendo uma equação diferencial ordinária para cada espécie química ou biológica, e aplicando o princípio de conservação de espécies. As interações energéticas e devido ao transporte de massa locais entre o elemento de volume em análise e os seus vizinhos imediatos são estabelecidas por correlações empíricas de transferência de massa e calor (válidas do regime laminar ao turbulento). O resultado é um sistema de equações diferenciais ordinárias em função somente do tempo para as grandezas de interesse, e
3. SOLUÇÃO NUMÉRICA.

O modelo de elementos de volume (MEV) pode ser classificado como um método *local*, uma vez que para cada elemento de volume as funções básicas são não nulas somente nesse subdomínio. Por outro lado, métodos *globais* usam funções básicas que são não nulas em todo o domínio de análise (FLETCHER, 1991).

Pela descrição do MEV, verificam-se as diferenças em relação a outros métodos numéricos locais, e.g., diferenças finitas (DF), elementos finitos (EF), volumes finitos (VF) (FLETCHER, 1991). Nesses últimos, primeiramente são escritas equações diferenciais parciais para as grandezas de interesse, em relação ao espaço e ao tempo. A seguir, é feita a discretização no espaço, o que gera um sistema de EDOs no tempo, a ser resolvido por algum método numérico à escolha do analista.

A inovação no presente modelo é que o tamanho dos volumes de controle (elementos de volume) não é necessariamente pequeno para se obter estabilidade numérica e resultados com precisão suficiente, como usualmente é requerido por outros métodos locais (e.g., DF, EF, VF), principalmente na presença de uma grande diversidade de materiais sólidos e ar, água, ou outros fluidos, interagindo no domínio da solução, uma vez que derivadas espaciais não são utilizadas. Ainda, como ponto inovador, um elemento pode conter uma mistura de componentes sólidos e fluidos. Neste caso, as propriedades físicas do elemento são calculadas como a média ponderada das propriedades dos diferentes componentes do elemento. A vantagem é que com um número baixo de elementos, a convergência pode ser atingida com um tempo computacional reduzido.

Ainda, elementos da malha que pertencem a um componente podem ser refrigerados com fluido em recirculação, i.e., circuitos de refrigeração com água ou outro fluido podem ser representados dentro da malha, sendo um diferencial em relação a outros métodos de modelagem. Além disso, diferentemente do método zonal (SONG *et al.*, 2013), paredes sólidas ou interfaces estão representadas dentro da malha.

A aplicação da metodologia nesta Tese é demonstrada primeiramente em dois sistemas onde a temperatura é a grandeza de interesse: acondicionamento de equipamentos eletrônicos tipo PEBB e um navio inteiramente elétrico que apresenta uma geometria complexa. Num segundo momento a metodologia é aplicada a sistemas fotobiorreatores compactos no qual a grandeza de interesse é a concentração de espécie. Estes equipamentos são utilizados na produção de biomassa algal que é destinada a fabricação de biodiesel.

### 3.2 MODELO GERAL

Primeiramente, a descrição do modelo matemático começa com a FIGURA 3.2 onde é mostrada uma célula típica (ou elemento de volume) que pode conter tanto fluido quanto material sólido, ou uma combinação dos dois. Cada elemento interage com outros elementos adjacentes, por meio de taxa de uma ou várias grandezas. Os símbolos  $\dot{G}_e$ ,  $\dot{G}_w$ ,  $\dot{G}_t$ ,  $\dot{G}_b$ ,  $\dot{G}_n$  e  $\dot{G}_s$  são as taxas da grandeza em análise pelas faces leste, oeste, topo, fundo, norte e sul, respectivamente. Estas grandezas podem ser massa, energia ou qualquer outra.

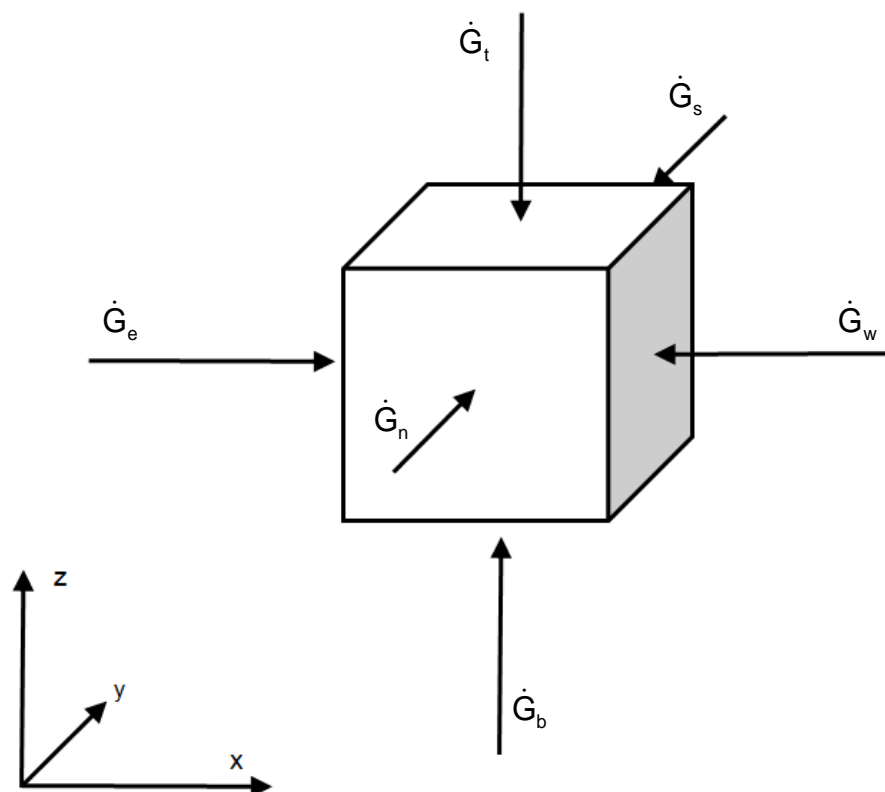


FIGURA 3.2 – ELEMENTO DE VOLUME TÍPICO COM TAXAS DE GRANDEZAS  
FONTE: O AUTOR (2013)

As equações de conservação (e.g., massa, energia, espécies) podem ser escritas para um campo escalar geral  $\phi$ , na forma concentrada, i.e., sem dependência espacial, para cada elemento de volume  $i$ , como:

$$\frac{d(\rho V \phi)_i}{dt} = \left[ \sum_{j=e,w,t,b,n,s} \frac{c_j}{c_i} (\dot{m}_{in,j} \phi_j - \dot{m}_{out,j} \phi_i) + \sum_{j=e,w,t,b,n,s} A_j \Gamma^\phi (\phi_j - \phi_i) + \frac{V_i}{c_i} S^\phi \right]_i \quad (3.1)$$

A EQUAÇÃO 3.1 representa a conservação da massa, quando  $S^\phi$  for igual a zero e  $\phi = 1$ . A equação da energia é obtida fazendo-se  $\phi = T$ , com o apropriado termo fonte  $S^\phi$  que neste caso inclui a geração interna de calor. A equação da energia fica completa fazendo-se  $\Gamma^\phi = U/c_i$  representado pelo coeficiente global de transferência de calor dividido pelo calor específico equivalente do elemento de volume.  $V$  é o volume e  $\rho$  é a massa específica equivalente do elemento de volume.

O primeiro termo do lado esquerdo da EQUAÇÃO 3.1 é o termo de acumulação e serve para avançar a solução no tempo, seguindo-se o comportamento transiente. Fisicamente representa a variação da grandeza  $\phi$  dentro do elemento de volume ao longo do tempo. O primeiro termo do lado direito representa o balanço advectivo da variável  $\phi$ . O segundo termo do lado direito representa o balanço dos fluxos difusivos, que podem ser usados, por exemplo, tanto para calor como para massa. O último termo,  $S^\phi$ , chamado de termo fonte, é responsável por acomodar todos os demais termos que não se encaixam na forma apresentada pela EQUAÇÃO 3.1. O termo fonte contém, no caso de  $\phi$  ser a temperatura, a geração de calor interna,  $\dot{Q}_{gen,i}$ . No caso de espécies, o termo  $S^\phi$  é a taxa de reação.

Para o problema de concentração de espécies, pode ser usada a TABELA 3.1. Nela são mostrados os demais parâmetros da EQUAÇÃO 3.1. Sendo  $\phi = Y_q$ , i.e., concentração da espécie  $q$ , o parâmetro  $\Gamma^\phi$  se torna  $\frac{\rho D_{AB}}{l_{i,j}/2}$  onde  $D_{AB}$  representa a difusividade da espécie  $A$  em  $B$  e  $l_{i,j}$  é a distância entre os centros dos elementos adjacentes  $i$  e  $j$ . Aqui, o termo  $S^\phi$  pode ter dois valores: i)  $Y_{q\mu}$  onde  $\mu$  é a taxa de conversão da espécie  $q$  ou ii)  $Y^0_{\mu R}$  onde  $R$  é a relação estequiométrica de consumo da espécie  $q$  em função da taxa de conversão da espécie  $0$ , que é a espécie base em relação a qual todas as outras estão ligadas.



TABELA 3.1 – VALORES PARA A EQUAÇÃO DO CAMPO ESCALAR GERAL

EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO	$\phi$	$c_j$	$c_i$	$\Gamma^\phi$	$S^\phi$
Massa Global	1	1	1	0	0
Energia	T	$c_j$	$c_i$	$\frac{U_j}{c_i}$	$\dot{Q}_{gen,i}/V_i$
Massa do Componente q	$Y_q$	1	1	$\frac{\rho D_{AB}}{l_{i,j}/2}$	$Y_\mu$ ou $Y^0_\mu R$

FONTE: O AUTOR (2013)

Na TABELA 3.1,  $c_j$  é o calor específico do fluido cruzando a face j quando for o caso. A variável  $c_i$  representa o calor específico do elemento de volume i.

Desta forma, a EQUAÇÃO 3.1 em conjunto com a TABELA 3.1 representa uma forma geral do método de elementos de volume. Isto significa que o sistema em estudo pode ser modelado pelo analista para diferentes fenômenos simplesmente escrevendo a EQUAÇÃO 3.1, quantas vezes forem necessárias, apenas tomando apropriadamente os coeficientes da TABELA 3.1.

Por exemplo, o balanço de massa do sistema em estudo pode ser obtido a partir da EQUAÇÃO 3.1 tomando-se os coeficientes da primeira linha da TABELA 3.1. Este procedimento resulta em:

$$\frac{d(\rho V)_i}{dt} = \sum_{j=e,w,t,b,n,s} (\dot{m}_{in,j} - \dot{m}_{out,j}) \quad (3.2)$$

que é a equação de conservação de massa.

Com o mesmo procedimento, mas desta vez tomando-se a segunda linha da TABELA 3.1 (conservação de energia), o resultado é:

$$\frac{d(\rho VT)_i}{dt} = \sum_{j=e,w,t,b,n,s} \frac{c_j}{c_i} (\dot{m}_{in,j} T_j - \dot{m}_{out,j} T_i) + \sum_{j=e,w,t,b,n,s} A_j \frac{U_j}{c_i} (T_j - T_i) + \frac{\dot{Q}_{gen,i}}{c_i}$$

i.e., reescrevendo:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{(\rho V c)} \left( \dot{Q}_{conv} + \sum_{j=e,w,t,b,n,s} \dot{Q}_j + \dot{Q}_{gen} \right)_i \quad (3.3)$$

que representa a equação de conservação da energia do elemento  $i$  mostrando os termos de convecção, condução e geração. Repetindo o processo para uma espécie  $q$  (massa do componente) é obtida a equação da concentração  $Y_q$ :

$$\frac{d(\rho V Y_q)_i}{dt} = \sum_{j=e,w,t,b,n,s} (\dot{m}_{in,j} Y_{q,j} - \dot{m}_{out,j} Y_{q,i}) + \sum_{j=e,w,t,b,n,s} A_j \frac{\rho D_{AB}}{l_{i,j}/2} (Y_{q,j} - Y_{q,i}) + V_i Y^0 \mu R \quad (3.4)$$

neste caso a concentração da espécie  $Y_q$  foi colocada em função da concentração da espécie  $Y^0$  por meio da constante estequiométrica  $R$ . Note que no primeiro termo do segundo membro da EQUAÇÃO 3.4,  $Y_{q,j}$  é a fração mássica do componente  $q$  que chega no elemento de volume  $i$ , e  $Y_{q,i}$  é a fração mássica do componente  $q$  saindo do elemento de volume  $i$ , i.e., após ter passado pelas possíveis reações que ocorram no elemento.

A densidade equivalente  $\rho$ , no caso do elemento de volume conter fluido, é a própria densidade do fluido. No caso do elemento conter equipamento  $\rho$  é calculado por:

$$\rho = \frac{m}{n \cdot V_e} \quad (3.5)$$

onde  $m$  é a massa total do equipamento a ser representando na malha,  $n$  é o número de elementos de volume que equipamento está ocupando na malha e  $V_e$  é o volume de cada elemento de volume ou célula.

O sistema de equações diferenciais ordinárias definido pela EQUAÇÃO 3.1, acrescentando condições iniciais dadas  $\phi_{i0}$ , formula um problema de valor inicial (PVI) para ser resolvido. A solução do PVI determina o campo escalar genérico dentro do domínio em qualquer instante de tempo.

Em seguida, quando  $\phi=T$  e for interesse, a umidade relativa em cada elemento com ar,  $\phi_i$ , (campo de umidade relativa) pode ser calculada a partir do campo de temperatura, assumindo um campo de umidade relativa inicial conhecido  $\phi_{i0}$ . Primeiro, a pressão de vapor inicial é calculada:

$$p_{v,i} = \varphi_{i0} \cdot p_{vs}(T_{i0}) \quad (3.6)$$

onde  $p_{v,i}$  é a pressão parcial de vapor no elemento de volume,  $\varphi_{i0}$  é a umidade relativa inicial e  $p_{vs}(T_{i0})$  é a pressão de saturação da água na temperatura  $T_{i0}$ .

É assumido que a umidade absoluta em cada elemento de volume permanece constante durante toda a simulação. Portanto, a umidade relativa de cada elemento que contém ar é computada como:

$$\varphi_i = \frac{p_{v,i}}{p_{vs}(T_i)} \quad (3.7)$$

onde  $p_{vs}(T_i)$  é a pressão de saturação da água na temperatura do elemento de volume  $T_i$ . Quando o elemento contém sólidos, líquidos ou uma combinação dos dois o valor zero é atribuído à umidade relativa, isto é,  $\varphi_i=0$ .

### 3.2.1 Taxas de transferência de calor através das faces dos elementos

Correlações empíricas (BEJAN, 1993 e 1995) são utilizadas para calcular os fluxos de calor através das faces de cada elemento de volume. Na presente formulação, três possibilidades de interação energética são possíveis: (i) fluido-sólido; (ii) fluido-fluido, ou (iii) sólido-sólido. Cada elemento tem quatro faces laterais as quais são nomeadas como leste, oeste, norte e sul, mais as faces de topo e de fundo. Cada face tem a possibilidade estar em contato com o exterior do domínio ou com outro elemento.

### 3.2.1.1 Face do elemento em contato com o exterior

O elemento pode conter componente sólido ou fluido e uma ou mais faces podem estar em contato com o exterior. A transferência de calor pode ocorrer como condução, convecção e/ou radiação.

A taxa de transferência de calor por radiação através da face do elemento é calculada por:

$$\dot{Q}_{\text{rad},j} = A_{i,j} \left\{ \alpha_j I - \varepsilon_j \sigma (T_{i,j}^4 - T_{\text{ext}}^4) \right\}, \quad j = e, w, n, s, t, b \quad (3.8)$$

onde o primeiro termo entre colchetes representa a porção da irradiação média do sol (DUFFIE e BECKMAN, 1974) absorvida pela face, quando existe incidência do sol;  $T_{\text{ext}} = T_{\infty}$  (temperatura do ar exterior) ou  $T_{\text{ext}} = T_{\text{sw}}$  (temperatura de outro fluido que envolve a superfície externa do domínio);  $\alpha$  e  $\varepsilon$  são a absortividade e a emissividade da face respectivamente,  $\sigma$  é constante de Stefan-Boltzman e  $A_{i,j}$  é a área da face do elemento. É assumido que  $I=0$  quando a superfície está em contato com outro fluido ou superfície que bloqueie eventualmente a luz solar.

A taxa total de transferência de calor (radiação, condução e convecção) através da face do elemento é, portanto, computada como segue:

$$\dot{Q}_{i,j} = \dot{Q}_{\text{rad},i,j} + U_{i,j} A_{i,j} (T_{\text{ext}} - T_i), \quad j = e, w, n, s, t, b \quad (3.9)$$

onde o coeficiente global de transferência de calor,  $U_{i,j}$  é dado por:

$$U_{i,j} = \frac{1}{R_{i,j}} \quad (3.10)$$

$$R_{i,j} = \frac{l_{i,j}/2}{k_i} + \frac{t_w}{k_w} + \frac{1}{h_{\text{ext}}} \quad (\text{elemento sólido}) \quad (3.11)$$

ou

$$R_{i,i} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{t_w}{k_w} + \frac{1}{h_{ext}} \quad (\text{elemento fluido}) \quad (3.12)$$

onde  $l_{i,j}$  é tanto o comprimento ou a largura do elemento,  $k_i$  é a condutividade térmica equivalente do elemento,  $t_w$  e  $k_w$  são a espessura da parede e a sua condutividade térmica, respectivamente,  $h_{int}$  e  $h_{ext}$  são os coeficientes de transferência de calor por convecção interno e externo.

O coeficiente de transferência de calor  $h$  é dado por:

(a) Convecção natural (BEJAN, 1993 e 1995),

$$h_i = \frac{k_f}{H} \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_H^{1/6}}{\left[ 1 + (0,492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.13)$$

onde  $k_f$  é a condutividade térmica do fluido,  $Pr$  é o número de Prandtl do fluido e:

$$Ra_H = \frac{g\beta}{\alpha_T \nu} H^3 |T_{neigh,i} - T_i|, \quad g \text{ é a aceleração da gravidade, } \beta \text{ é o coeficiente de expansão}$$

volumétrica do fluido,  $\alpha_T$  é a difusividade térmica do fluido e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.  $T_{neigh,i}$  é a temperatura do elemento vizinho ao elemento em análise ou a temperatura exterior, e  $H$  é a altura total varrida do sólido em análise.

A EQUAÇÃO 3.13 é válida para todas as faixas do número de Rayleigh – laminar, transição e turbulento – com as propriedades do fluido avaliadas na temperatura de filme, isto é,  $T_{filme} = (T_{neigh,i} + T_i)/2$  (CHURCHILL e CHU, 1975).

(b) Convecção forçada (BEJAN, 1993 e 1995):

$$h = \frac{k_f}{L} (0.064 Pr^{1/3} Re_L^{1/2}), \quad \text{para } Re_L < 5 \times 10^5 \quad (3.14)$$

ou

$$h = \frac{k_f}{L} \left\{ 0.037 Pr^{1/3} (Re_L^{4/5} - 23550) \right\}, \quad \text{para } Re_L > 5 \times 10^5 \quad (3.15)$$

onde  $Re_L = \frac{v_f L}{\nu}$ ,  $v_f$  é a velocidade do fluido,  $L$  é o comprimento sólido varrido em análise.

(c) Convecção mista: uma vez calculados o coeficiente de filme de convecção natural,  $h_n$ , pela EQUAÇÃO 3.13 e o coeficiente de filme de convecção forçada pela EQUAÇÕES 3.14 ou 3.15,  $h_f$ , o coeficiente de filme,  $h_i$ , será igual ao maior dos dois. Isso se aplica no caso de existir um campo de velocidades  $v_f$  pré-definido. Eventualmente  $v_f$  pode estar numa escala comparável à velocidade de convecção natural. Assim, caso o coeficiente de filme por convecção forçada for menor que o coeficiente de filme para convecção natural, faz sentido tomar como verdadeiro o coeficiente de filme por convecção natural. Esta situação é comum em equipamentos eletrônicos, onde mesmo existindo um ventilador, ocorrem áreas com gradientes de temperatura típicos de transferência de calor por convecção natural.

### 3.2.1.2 Face lateral em contato com outro elemento de volume

É assumido que não há fluxo através de um contorno fluido-fluido na direção horizontal; o escoamento ocorre apenas na direção vertical, a menos no caso de haver um elemento com estratégia de resfriamento tipo 6 (refrigerado por um fluxo cruzado) que será apresentado mais adiante. Enquanto ao se assumir que há uma mudança de temperatura repentina de um elemento para o outro não parece ser realista, isto é considerado aceitável neste ambiente de simulação devido ao grande tamanho dos elementos de volume. Esta hipótese simplifica em muito a definição das equações e isso acelera os cálculos.

Se a interface é fluido-fluido ou sólido-sólido, apenas condução ocorre entre os elementos adjacentes devido à hipótese de não haver fluxo na horizontal. Outra possibilidade é uma interação fluido-sólido entre dois elementos, neste caso a transferência de calor através da face é de convecção.

Para contato fluido-fluido, desde que assumido que não há fluxo na horizontal, ou seja, pelas faces laterais, a taxa de transferência de calor é dada por:

$$\dot{Q}_{l,i} = -U_{l,i} A_{l,i} (T_i - T_a), \quad l = e, w, n, s \quad (3.16)$$

onde  $a$  indica o elemento adjacente, e

$$U_{l,i} = \frac{k_f}{(l_{m,i} + l_{m,a})/2} \quad (3.17)$$

onde  $l_{m,i}$  e  $l_{m,a}$  são tanto o comprimento ou a largura da célula, de acordo com o índice  $m=x$  ou  $y$ , se o  $i$ -ésimo ou  $a$ -ésimo lado da célula for leste/oeste ou norte/sul, respectivamente.

Para o contato sólido/sólido, o fluxo de calor é obtido da EQUAÇÃO 3.16, onde desta vez:

$$U_{l,i} = \frac{1}{\frac{l_{m,i}/2}{k_i} + \frac{l_{m,a}/2}{k_a}} \quad (3.18)$$

Quando o contato é do tipo fluido/sólido, a transferência de calor se dá por convecção. A EQUAÇÃO 3.16 é usada com o coeficiente global de transferência de calor  $U_{l,i}$  dado por:

$$U_{l,i} = C_a \frac{1}{\frac{1}{h_l} + \frac{l_{m,c}/2}{k_c}} \quad (3.19)$$

onde o índice  $c$  é o número do elemento.  $C_a = S_{\text{real}}/S_{\text{malha}}$  é o fator de correção de áreas de convecção, onde  $S_{\text{real}}$  é área de convecção real do componente sólido e  $S_{\text{malha}}$  é a área do componente representada na malha. Desta forma, o fator  $C_a$  faz com que a superfície de convecção usada nos cálculos tenha a mesma área que a superfície do componente real. Isso é especialmente importante no caso de componentes aletados, nos quais a representação na malha difere em mais de 100% do equipamento real.

### 3.2.1.3 Face do topo/fundo em contato em outro elemento

Como cada elemento pode conter fluido ou componente sólido. Três tipos de interação devem ser levadas em conta: (a) fluido/fluido, (b) fluido/sólido, e (c) sólido/sólido.

#### (i) Fluido/Fluido

Ambos os elementos contém fluido e o fluxo de calor é dado por:

$$\dot{Q}_{l,i} = \dot{m}_{l,i} c_{p,f} (T_a - T_i); \quad l=t, b \quad (3.20)$$

onde  $\dot{m}_{l,i} = \rho_f v_i \frac{A_{l,i}}{2}$ .

Para convecção natural, a estimativa da velocidade do fluido cruzando a face do elemento é  $v_i = \alpha_T \left( \frac{g\beta}{\alpha_T \nu} |T_a - T_i| H \right)^{1/2}$ , a qual é uma escala representativa da convecção natural (BEJAN, 1993 e 1995). É assumido que metade da face do topo ou do fundo do elemento é cruzada por um fluxo na direção vertical e a outra metade na direção oposta.

No caso de convecção forçada, a EQUAÇÃO 3.20 é utilizada com  $l=e,w,n,s$ . Quando existir um campo de velocidades  $v_f$  pré-definido cruzando o domínio no plano horizontal, será necessária a comparação entre  $v_i$  e  $v_f$ . Se a velocidade devida à convecção natural for maior que a velocidade do campo pré-definido, então será usada a velocidade devida à convecção natural caso contrário, será usada a velocidade pré-definida.



## (b) Fluido/Sólido

O fluxo de calor cruzando a face do topo ou do fundo segue a EQUAÇÃO 3.16, com índice  $l = t, b$ .  $U_{l,i}$  é computado com as EQUAÇÃO 3.19 e  $l_{m,c}$  é substituído por  $l_{z,c}$ .

## (c) Sólido/Sólido

Quando ambos os elementos contém componentes sólidos, o fluxo de calor também é calculado seguindo a EQUAÇÃO 3.16 com  $U_{l,i}$  dado pela EQUAÇÃO 3.14 onde  $l = t, b$ . Os comprimentos  $l_{m,i}$  e  $l_{m,a}$  são substituídos por  $l_{z,i}$  e  $l_{z,a}$ , respectivamente.

### 3.2.2 Fluidos refrigerantes e suas taxas de transferência de calor

Para levar em conta os diferentes componentes do sistema em análise suas estratégias de resfriamento, sete tipos de elementos de volume que são definidos pelo seu conteúdo: (0) somente ar; (1) sólido ou combinação de sólido e fluido; (2) trocador de calor compacto; (3) unidade de fluido gelado; (4) sistema refrigerado por fluido interno (circuito fechado); (5) sistema refrigerado por fluido externo (circuito aberto); e (6) elemento fluido refrigerado por um escoamento cruzado (por exemplo, fluxo de ar externo induzido por um ventilador).

Nos elementos tipo 0 e 1, na EQUAÇÃO 3.3,  $\dot{Q}_{conv,i} = 0$ , pois não há correntes de fluido refrigerante (interno ou externo) correndo através do elemento. Contudo, para os elementos tipos 2 a 6,  $\dot{Q}_{conv,i}$  não é zero e resulta da estratégia de resfriamento do sistema.

O sistema pode ser dividido em zonas e cada zona resfriada separadamente, com combinações de, por exemplo, ar condicionado, água de circuito externo e água

de circuito interno fechado. O sistema pode conter conexões cruzadas entre as zonas para aumentar a redundância. O circuito de água interno pode conter água doce (fresca), desmineralizada, ou misturada com anticongelante. Similarmente, o circuito de água externo pode conter, por exemplo, água do mar, no caso de um navio. Para facilitar a discussão, o texto se refere ao fluido interno como água doce e ao externo como água salgada.

A água fresca flui num circuito fechado coletando calor de cada componente gerador de calor dentro das zonas do sistema, e então rejeitando o calor para um fluido externo (por exemplo, água do mar) via um trocador de calor, uma unidade de água gelada ou ambos, i.e., pode haver somente o trocador de calor ou a unidade de água gelada, ou eles podem operar em série. Por exemplo, o uso do trocador de calor não é interessante quando a corrente fria estiver numa temperatura maior que a temperatura máxima da água fresca. Outras estratégias de resfriamento podem ser usadas, tal como componentes resfriados por ar condicionado e diretamente por fluido externo. O objetivo destas estratégias de resfriamento é que os campos de temperatura e umidade relativa das zonas e de todo o sistema permaneçam dentro de limites pré-estabelecidos no projeto.

O calculo começa com a determinação da temperatura do fluido interno na entrada do trocador de calor em cada zona do sistema. Para isso, um misturador de água fresca é colocado na entrada do trocador de calor, no qual as entradas são as vazões que vem da saída de cada componente resfriado por água fresca na zona, e a saída é a vazão total de água fresca da zona. Portanto, o balanço de energia em tal misturador permite o calculo da temperatura de mistura na saída da zona, a qual é a temperatura de entrada do trocador de calor, como segue:

$$T_{fw,in} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{eq}} \dot{m}_{fw,j} T_j}{\dot{m}_{fw}} \quad (3.21)$$

onde  $\dot{m}_{fw,j}$  é a vazão de água fresca vindo da saída do componente  $j$ ;  $T_j$  é a temperatura do componente  $j$  (assumindo que é igual a temperatura da água saindo dele),  $\dot{m}_{fw}$  é a vazão total de água doce da zona, e  $n_{eq}$  é o número total de

componentes refrigerados por água doce na zona. Quando  $\dot{m}_{fw} = 0$  (por exemplo, bomba desligada) em uma zona particular, a EQUAÇÃO 3.21 não é usada.

As taxas de transferência de calor coletado/rejeitado por fluido interno ou externo (i.e., água fresca ou do mar),  $\dot{Q}_{conv,i}$ , são então calculadas para cada tipo de elemento como segue:

(i) Elemento tipo 2 (trocador de calor)

O método da efetividade-NTU (BEJAN, 1993; KAYS e LONDON, 1984) é utilizado para estimar a efetividade do trocador de calor, o qual pode ser aplicado a qualquer tipo de trocador de calor compacto (KAYS e LONDON, 1984). Assumindo um trocador de calor em contracorrente, a efetividade é dada por:

$$\varepsilon_{hx} = \frac{1 - \exp\{-NTU(1 - C_{min}/C_{max})\}}{1 - (1 - C_{min}/C_{max})\exp\{-NTU(1 - C_{min}/C_{max})\}} \quad (3.22)$$

onde  $NTU = (UA)_{hx} / C_{min}$ ;  $U$  e  $A$  são o coeficiente de transferência de calor global e a área de transferência, respectivamente; o subscrito  $hx$  se refere ao trocador de calor;  $C_{min} = (\dot{m}c)_i$  é a menor capacidade térmica entre as duas correntes ( $i =$  fluido interno ou externo) e  $C_{max}$  é a maior capacidade térmica.

Da definição de efetividade-NTU (BEJAN, 1993; KAYS e LONDON, 1984) e da EQUAÇÃO 3.22, a temperatura de saída do trocador de calor de água do mar é calculada por:

$$T_{sw,out} = \frac{\varepsilon_{hx} \dot{m}_{fw} c_{fw} (T_{fw,in} - T_{sw,in})}{\dot{m}_{sw} c_{sw}} + T_{sw,in} \quad (3.23)$$

onde  $\dot{m}$  e  $c$  são a vazão mássica e o calor específico, respectivamente,  $T$  é a temperatura, os subscritos fw, sw, in e out, se referem a água fresca, água do mar, entrada e saída respectivamente. Quando  $\dot{m}_{sw} = 0$  (bomba desligada) em uma zona em particular, as EQUAÇÕES 3.22 e 3.23 não são usadas, é assumido que nenhum fluxo ocorre e então  $\dot{Q}_{conv} = 0$ .

Portanto, a taxa de transferência de calor líquida por meio dos fluxos de água cruzando o elemento tipo 2 é calculado por:

$$\dot{Q}_{conv,i} = \dot{m}_{fw} c_{fw} (T_{fw,in} - T_i) + \dot{m}_{sw} c_{sw} (T_{sw,in} - T_{sw,out}) \quad (3.24)$$

onde o subscrito  $i$  se refere ao elemento tipo 2 em análise,  $T_i$  é a temperatura do elemento a qual é assumida igual a temperatura de saída da água fresca, de acordo com a hipótese assumida de propriedades termodinâmicas uniformes dentro do volume de controle.

(ii) Elemento tipo 3 (unidade de água gelada)

A taxa de transferência de calor líquida por meio da corrente de água fresca cruzando o elemento tipo 3 é calculada por:

$$\dot{Q}_{conv,i} = \dot{m}_{fw} c_{fw} (T_{fw,out} - T_i) \quad (3.25)$$

onde o subscrito  $i$  se refere ao elemento tipo 3 em análise e  $T_{fw,out}$  é a temperatura de saída da água fresca do trocador de calor.

No elemento tipo 3,  $\dot{Q}_{gen} \leq 0$ , o qual é um parâmetro de projeto correspondendo a taxa de refrigeração nominal da unidade de fluido gelado selecionada. O sinal de igual significa a situação quando a unidade está desligada. Nesta unidade, é assumido que o calor é

rejeitado para um fluxo de água externo (por exemplo, água do mar) que extrai calor do condensador.

(iii) Elemento tipo 4 (componente refrigerado por água fresca)

A taxa de transferência de calor líquida por meio da corrente de água fresca cruzando qualquer elemento tipo 4 na zona em análise é calculada por:

$$\dot{Q}_{\text{conv},i} = \dot{m}_{\text{fw}} c_{\text{fw}} (T_{\text{cw,out}} - T_i) \quad (3.26)$$

onde o subscrito i se refere ao elemento tipo 4 em análise e  $T_{\text{cw,out}}$  é a temperatura de saída do fluido da unidade de água gelada.

Alguns componentes podem possuir sistemas de resfriamento dedicados, o qual pode ser um sistema de refrigeração ou um trocador de calor secundário. No caso de um sistema de refrigeração dedicado, o calor é extraído da carga por meio de um evaporador. A taxa de transferência de calor que é rejeitado no condensador dentro do elemento é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{gen}} = \frac{1 + \eta}{\eta} \dot{Q}_{\text{evap,DCS}} \quad (3.27)$$

onde  $\dot{Q}_{\text{evap,DCS}}$  é um parâmetro de projeto correspondente à taxa nominal de refrigeração da unidade que foi selecionada para refrigerar a carga localmente a qual é projetada para se ajustar à taxa de geração de calor do componente, e  $\eta$  é a eficiência térmica nominal da unidade (ou COP – coeficiente de performance).

No caso de um trocador de calor secundário,  $\dot{Q}_{\text{gen}}$  é assumido como sendo a taxa de geração de calor do componente.

## (iv) Elemento tipo 5 (componente refrigerado por água do mar auxiliar)

A taxa de transferência de calor líquida por meio da corrente de água do mar auxiliar cruzando qualquer elemento tipo 5 na zona em análise é calculada por:

$$\dot{Q}_{\text{conv},i} = \dot{m}_{\text{asw}} c_{\text{sw}} (T_{\text{sw,in}} - T_i) \quad (3.28)$$

onde o subscrito  $i$  se refere ao elemento tipo 5 em análise e  $T_{\text{sw,in}}$  é a temperatura de entrada da água do mar

## (v) Elemento tipo 6 (elemento fluido refrigerado por um escoamento cruzado)

Para se tratar um elemento fluido que pode ser cruzado por um escoamento de fluido refrigerante (por exemplo, fluxo de ar externo induzido por um ventilador), um tipo de elemento de volume adicional é definido com a taxa de transferência de calor líquida por convecção,  $\dot{Q}_{\text{conv}}$ , calculada como segue:

$$\dot{Q}_{\text{conv},i} = \dot{m}_i c_{p,f} (T_{\text{in}} - T_i) \quad (3.29)$$

onde  $\dot{m}_i = \rho_f v_i A_i$ ,  $c_{p,f}$  é o calor específico a pressão constante para um gás (por exemplo, ar) ou simplesmente o calor específico para um líquido refrigerante;  $\rho_f$  é a densidade do fluido refrigerante;  $v_i$  é a velocidade com que o fluido refrigerante cruza a face do EV  $i$ ;  $A_i$  é a área lateral da face do EV que cruzado pelo escoamento, e  $T_{\text{in}}$  é a temperatura com que o fluido entra no EV  $i$ . Para o EV localizado na parede (contorno do domínio) que

contém a entrada do fluido refrigerante,  $T_{in}$  é a temperatura de entrada do fluido refrigerante, isto é, temperatura do ar externo.

$$v_i = \frac{\dot{m}_{fan}}{\rho_f A_{free}} \quad (3.30)$$

Na EQUAÇÃO 3.30,  $\dot{m}_{fan}$  é um parâmetro conhecido, baseado na especificação ou medido diretamente no orifício de saída onde o ventilador está instalado e onde  $A_{free}$  é a área total da seção transversal livre da geometria em estudo. Então, existe um fluxo de refrigerante ao redor dos equipamentos dentro do sistema e,  $v_i$  para cada EV com ar é estimado, baseado nas propriedades do fluido e na seção transversal do EV  $i$ . A conservação de massa é satisfeita de tal maneira que a taxa de entrada de massa de fluido refrigerante é mesma que sai.

### 3.3 MODELO PARA ACONDICIONAMENTO DE ELETRÔNICOS PEBB

O sistema físico em análise é um gabinete contendo equipamento eletrônico. Estes equipamentos formam um conversor de potência e cada um deles gera calor com uma taxa conhecida. O problema consiste em calcular o campo de temperatura e de umidade relativa dentro do gabinete.

Na FIGURA 3.3 são apresentados, esquematicamente, os componentes de interesse de um sistema PEBB que são: dissipador, indutor, fusível CA, fusível CC e capacitores. A EQUAÇÃO 3.1 será aplicada ao sistema PEBB utilizando a segunda linha da TABELA 3.1, equação de conservação da energia, tornando-se a EQUAÇÃO 3.3. O balanço de massa do sistema é respeitado via a EQUAÇÃO 3.2. As taxas de transferência de calor serão calculadas de acordo com o modelo geral apresentado anteriormente

Na mesma figura podem ser vistos o ventilador e  $A_{free}$  que é a área da seção transversal livre. O cálculo da velocidade do fluido refrigerante, ar, que cruza o gabinete pode ser calculada em função da área de passagem  $A_{free,t}$  e  $A_{free,b}$  e da vazão do ventilador  $\dot{m}_{fan}$ . Desta forma, um campo de velocidade pode ser imposto ao sistema a priori. Os elementos contendo ar serão do tipo 6, i.e., elemento fluido refrigerado por um escoamento cruzado.

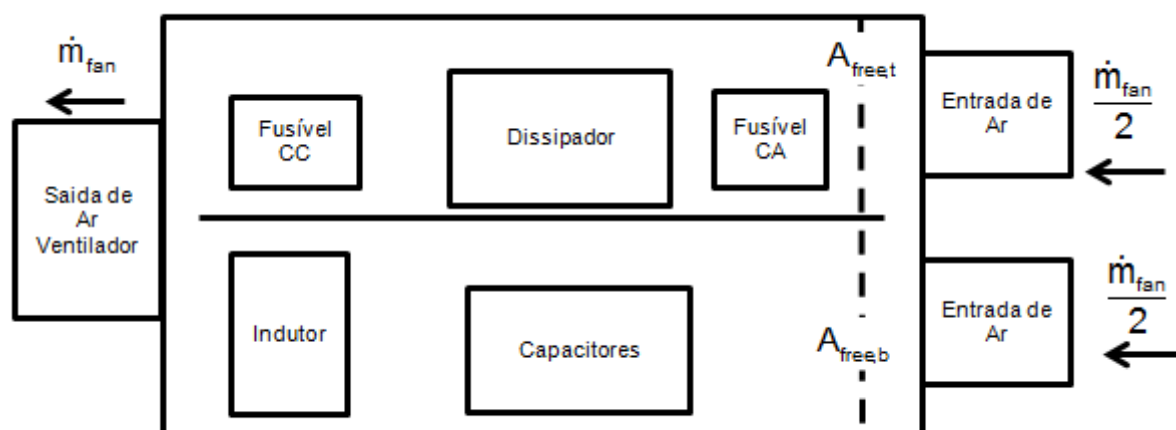


FIGURA 3.3 – VISTA ESQUEMÁTICA DO PEBB  
FONTE: DILAY *et al.*, (2013)

### 3.4 MODELO PARA NAVIO INTEIRAMENTE ELÉTRICO NOCIONAL

O objeto do estudo do navio inteiramente elétrico é obter as distribuições de temperatura e umidade relativa no seu interior. Dentro do navio, todos os equipamentos geram calor e se utilizam de várias estratégias de resfriamento. Portanto, o modelo geral apresentado anteriormente será aplicado na forma da EQUAÇÃO 3.1 utilizando a segunda linha TABELA 3.1, equação de conservação de energia. A conservação da massa é aplicada pela mesma equação, mas desta vez utilizando a primeira linha da tabela, i.e., equação de conservação de massa.



Nesta aplicação serão utilizadas as estratégias de resfriamento de trocador de calor (elemento tipo 2), unidade de água gelada (elemento tipo 3), resfriamento por água fresca (elemento tipo 4) e, resfriamento auxiliar por fluido externo (elemento tipo 5) neste caso água do mar.

### 3.5 MODELO ADIMENSIONAL PARA FOTOBIORREADORES COMPACTOS

O sistema físico em análise consiste num feixe de tubos transparentes paralelos nos quais circula o meio de produção contendo microalgas. No interior destes tubos ocorre o processo de fotossíntese alimentado pela luz solar e o consequente crescimento da biomassa de microalgas. O gás carbônico necessário à fotossíntese é introduzido no sistema através de um equipamento gaseificador/degaseificador. Neste equipamento ocorre a injeção de ar atmosférico contendo gás carbônico e também ocorre a expulsão do oxigênio gerado durante o processo de fotossíntese. O presente sistema é dito compacto por ter condições de ocupar uma área de terreno muito menor do que sistemas tradicionais com a mesma capacidade de produção como é o caso das lagoas. O projeto do feixe tubular do fotobiorreator construído na UFPR-NPDEAS é mostrado na FIGURA 3.4. É mostrado nos detalhes a entrada de meio de cultivo (topo) e a saída de meio (em baixo). A saída do feixe é conectada à bomba que mantém o meio de cultivo circulando entre o feixe tubular e o sistema gaseificador/degaseificador, de onde o meio de cultivo retorna ao feixe pela entrada do topo.

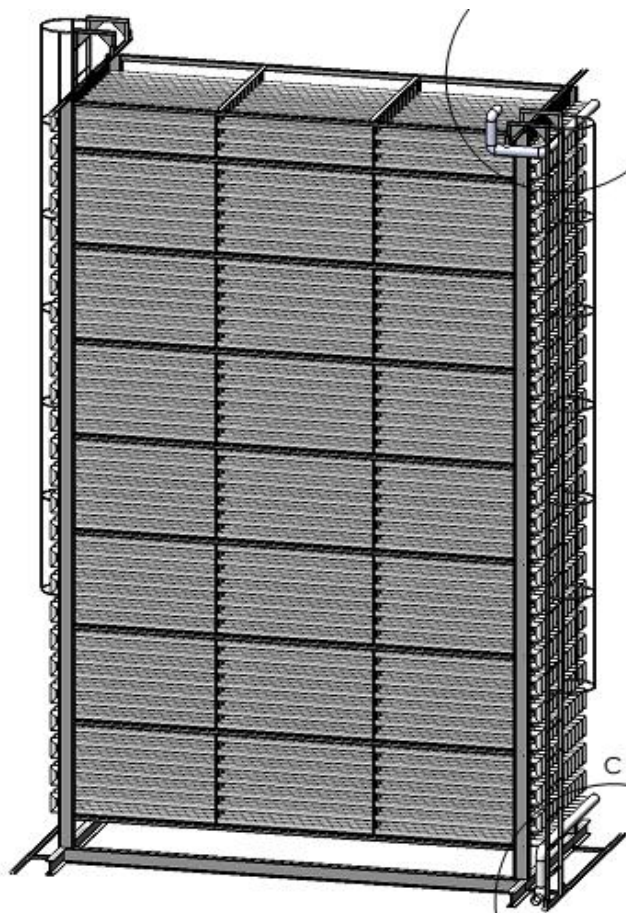


FIGURA 3.4 – PROJETO DO FEIXE TUBULAR DE UM FOTOBIORREATOR CONSTRUÍDO NA UFPR-NPDEAS  
FONTE: ADAPTADO DE STALL (2010)

Neste modelo, a lei de Conservação de Energia é usada para calcular a temperatura do meio de cultivo dentro do fotobiorreator. A lei de Conservação das Espécies (Continuidade) é usada para calcular a concentração de microalgas,  $\text{CO}_2$ , e  $\text{O}_2$  como função do tempo. O sistema foi dividido em feixe tubular, coluna de gaseificação/degaseificação e bomba. A bomba é responsável somente por gerar a diferença de pressão suficiente para criar escoamento no sistema, portanto, não será modelada neste trabalho.

Neste modelo adimensional, todas as variáveis são diretamente proporcionais às dimensões verdadeiras. Portanto, isso permite aumentar ou reduzir o tamanho de qualquer sistema de engenharia com características similares ao sistema analisado pelo modelo. Outro aspecto importante é que qualquer valor de uma variável adimensional pode representar todo um conjunto de valores de variáveis dimensionais. Fisicamente, o conjunto de resultados de um modelo adimensional

representa a resposta do sistema a numerosas combinações de parâmetros de projeto (geometria, arquitetura) e condições de operações (condições do ambiente, taxas mássicas de fluxo, etc) sem ser necessária a simulação de cada condição individualmente. Além disso, um modelo adimensional melhora a estabilidade numérica pela seleção de uma escala apropriada das variáveis físicas e também produz resultados generalizados, ou normalizados, que podem gerar tabelas e gráficos válidos para inúmeras configurações. O primeiro passo nesta direção é definir os grupos adimensionais.

### 3.5.1 Grupos adimensionais

Variáveis adimensionais são necessárias para tornar possível a obtenção de resultados generalizados. Uma importante restrição na produção de biomassa é o volume total do sistema, definido como  $V_T=L.W.H$ , onde  $L$  representa o comprimento,  $W$  representa a largura e  $H$  a altura do fotobiorreator. Desta forma, faz sentido colocar todas as dimensões do sistema em função do volume total do fotobiorreator. Assim, o comprimento adimensional do tubo, diâmetro adimensional, espessura adimensional e área adimensional são definidos por:

$$L_{\text{ref}} = V_T^{1/3}, \quad \tilde{d} = \frac{d}{V_T^{1/3}}, \quad \tilde{e} = \frac{e}{V_T^{1/3}}, \quad \tilde{V} = \frac{V_i}{V_T}, \quad \tilde{A} = \frac{A}{V_T^{2/3}} \quad (3.31)$$

A taxa de fluxo de massa de referência, massa, calores específicos, densidade, tempo e taxa de fluxo de massa, todos adimensionais são definidos por:

$$\dot{m}_{\text{ref}} = \frac{\dot{W}}{\Delta p}, \quad \tilde{m}_i = \frac{m_i}{\rho_w V_T}, \quad \tilde{c}_i = \frac{c_i}{c_w}, \quad \tilde{\rho} = \frac{\rho}{\rho_w}, \quad \tilde{t} = \frac{t}{\dot{m}_{\text{ref}} / (\rho_w V_T)}, \quad \tilde{M} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{ref}}}, \quad (3.32)$$

$$\tau_i = \frac{T_i}{T_\infty}$$

onde  $\dot{W}$  é a potência da bomba,  $\Delta p$  é a variação de pressão da bomba,  $\rho_w$  é a massa específica da água,  $c_w$  é o calor específico da água e  $T_\infty$  é a temperatura atmosférica.

O coeficiente de convecção, radiação absorvida pelo tubo, radiação emitida, radiação transmitida pela parede do tubo e taxa de crescimento das microalgas, todas na forma adimensional são definidas por:

$$H_i = \frac{h_i A_i}{\dot{m}_{ref} c_w}, \quad \tilde{\Gamma} = \frac{\alpha I_i A_i}{\dot{m}_{ref} c_w}, \quad \tilde{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_i \sigma A_i}{\dot{m}_{ref} c_w}, \quad \tilde{\gamma} = \frac{\gamma I_i A_i}{\dot{m}_{ref} c_w}, \quad \tilde{\psi}_i = \frac{\psi_i}{\dot{m}_{ref} / (\rho_w V_T)} \quad (3.33)$$

onde  $h_i$  é o coeficiente de convecção,  $A_i$  é a área da superfície do tubo,  $I_i$  é a irradiação,  $\alpha$  é a absorvidade,  $\varepsilon$  é a emissividade,  $\gamma$  é a transmissividade e  $\psi$  é a taxa de crescimento das microalgas.

### 3.5.2 Feixe tubular

O feixe tubular consiste num conjunto de tubos transparentes dispostos paralelamente como mostra a FIGURA 3.4. O crescimento das microalgas ocorre dentro deste feixe de tubos. A luz, solar ou artificial, alimenta o processo de fotossíntese responsável pelo aumento da quantidade de biomassa. Além da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), os tubos recebem calor via a radiação solar e também interagem termicamente com o ar atmosférico. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é a radiação eletromagnética compreendida na faixa de 400-700  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda, espectro visível, e fornece a energia necessária ao processo da fotossíntese.

O feixe de tubos foi dividido em elementos menores. Cada elemento é formado pela parede do tubo ou seu conteúdo, ou seja, meio de cultivo. Assim, existem dois tipos de elemento: i) meio de cultivo e ii) parede sólida. A FIGURA 3.5

apresenta um diagrama esquemático destes elementos onde  $L$  é o comprimento,  $D$  é o diâmetro interno e  $\delta$  é a espessura da parede do tubo. Princípios de Termodinâmica, Biologia, transferência de calor e massa e correlações empíricas foram aplicados a cada parte do elemento de volume. O objetivo é obter um sistema de equações diferenciais ordinárias (ODE) que capture o comportamento do sistema (DILAY *et al.* 2010).

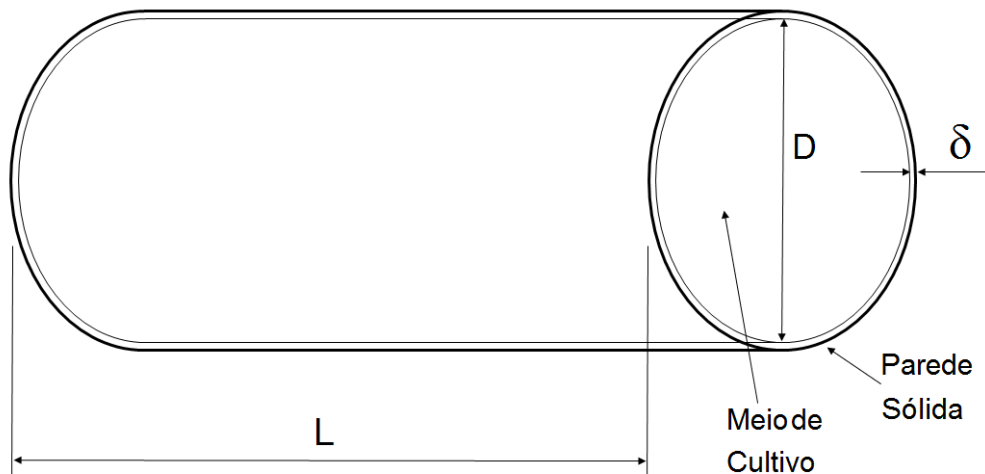


FIGURA 3.5 – ELEMENTO DE VOLUME PAREDE E ELEMENTO MEIO DE CULTIVO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

### 3.5.2.1 Conservação de espécies

O meio de cultivo contido nos tubos consiste de água,  $O_2$ ,  $CO_2$ , microalgas e nutrientes. A aplicação da Lei de Conservação das Espécies em cada elemento de volume resulta em:

$$\tilde{V}^{(i)} \frac{dY_i^{(i)}}{d\tilde{t}} = \frac{\dot{M}}{\bar{\rho}} (Y_i^{(j-1)} - Y_i^{(i)}) + \tilde{V}^{(i)} Y_i^{(i)} \tilde{\psi} \quad (i=1) \quad (3.34)$$

Essa equação corresponde ao aumento de massa da espécie  $i=1$ , microalgas, isto é, a taxa de acumulação de massa dentro do elemento. Esta equação considera um termo de transporte de massa por advecção e um termo gerador. O termo

difusivo é desprezado por ser muito menor que o termo de transporte por advecção como pode ser demonstrado por meio da análise do número de Péclet. Nesta equação  $Y_1$  é a concentração da espécie  $i=1$ , microalga.

As concentrações de  $\text{CO}_2$  ( $i=2$ ),  $\text{O}_2$  ( $i=3$ ),  $\text{NO}_3$  ( $i=4$ ) e  $\text{PO}_4$  ( $i=5$ ) são calculadas usando a Lei de conservação das espécies. Aqui novamente o termo difusivo é desprezado por ser muito menor que o termo advectivo. O coeficiente estequiométrico  $R_i$  representa a taxa de geração da espécie  $i$  em relação à espécie 1 (microalga).

$$\tilde{V}^{(i)} \frac{dY_i^{(i)}}{d\tilde{t}} = \frac{\dot{M}}{\bar{\rho}} (Y_i^{(i-1)} - Y_i^{(i)}) + R_i \tilde{V}^{(i)} Y_1^{(i)} \tilde{\psi} \quad (i=2, 3, 4 \text{ e } 5) \quad (3.35)$$

A abordagem baseada nas relações estequiométricas não garante o fechamento do balanço de massa, pois, essas relações não necessariamente englobam todos os reagentes e produtos formados. Assim, é preciso criar uma relação complementar envolvendo todas as substâncias presentes para garantir a Lei de Conservação de Massa. A variável  $y_{\text{outros}}$  é a concentração de todas as demais espécies que não foram contempladas nas equações anteriores.

$$Y_{\text{outros}} = 1 - \sum_{i=1}^n Y_i = 1 - Y_{\text{alga}} - Y_{\text{CO}_2} - Y_{\text{O}_2} - Y_{\text{NO}_3} - Y_{\text{PO}_4} - Y_S \quad (3.36)$$

A taxa de crescimento das microalgas é influenciada pela temperatura, disponibilidade de  $\text{CO}_2$ , concentrações de substratos inibidores e pela radiação solar. Cada espécie de microalga tem diferentes taxas de irradiação e temperaturas apropriadas ao bom crescimento. Iluminação e temperaturas inadequadas inibem o crescimento e podem levar as células à morte. Molina Grima *et al.* (1994), Richmod (1992), Sanchez *et al.* (2008), Seronotti *et al.* (2004) e Subramanian e Thajuddin (2005) propuseram equações para tentar correlacionar a taxa específica de crescimento  $\tilde{\psi}$ , como função da temperatura  $T$  e da intensidade da iluminação média dentro dos tubos  $I_{\text{avg}}$ . Neste trabalho, será usado um modelo baseado na proposta de Balmant *et al.* (2011) que estima a cinética de crescimento das microalgas em função da temperatura  $T$ , fluxo luminoso  $I$ , concentrações de gás carbônico  $[\text{CO}_2]$ , oxigênio  $[\text{O}_2]$ , nitrato  $[\text{NO}_3^-]$  e fosfato  $[\text{PO}_4^{3-}]$ . Além disso, foi incluído

aqui um termo que leva em conta o pH do meio de cultivo e o equacionamento é colocado na forma adimensional. O fluxo luminoso é calculado por um algoritmo de *Ray Tracing* (DILAY *et al.* 2010).

$$\psi = \mu_{\max} \cdot \mu(I^{(j)}) \cdot \mu(t^{(j)}) \cdot \mu([CO_2]^{(j)}) \cdot \mu([O_2]^{(j)}) \cdot \mu([NO_3^-]^{(j)}) \cdot \mu([PO_4^{3-}]^{(j)}) \cdot \mu(pH^{(j)}) - \mu_{\text{manut}} \quad (3.37)$$

onde  $\mu_{\max}$  representa a taxa de crescimento máxima calculada da conforme Pérez *et al.* (2008) numa aplicação da equação de Arrhenius.

$$\mu_{\max} = A_1 e^{\left(\frac{E_a}{RT^{(j)}}\right)} - A_2 e^{\left(\frac{E_b}{RT^{(j)}}\right)} \quad (3.38)$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são os fatores de frequência ( $h^{-1}$ ),  $E_a$  é a energia de ativação de crescimento e  $E_b$  é a energia de ativação da degradação celular.  $R$  é a constante universal dos gases (kJ/mol).

A taxa de crescimento em função do fluxo luminoso é calculada conforme Sánchez *et al.* (2008):

$$\mu(I^{(j)}) = \frac{(I_{\text{médio}}^{(j)})^n}{\left(\frac{I_{k,\max} I_0}{I'_k + I_0}\right)^n + (I_{\text{médio}}^{(j)})^n} \quad (3.39)$$

Nesta equação  $I_{\text{médio}}$  é o fluxo luminoso médio dentro do meio de produção,  $I_0$  é o fluxo luminoso que atinge a superfície do meio,  $I'_k$  e  $I_{k,\max}$  são as constantes de irradiação.

O carbono, fornecido principalmente pelo dióxido de carbono, é o principal elemento necessário para o crescimento das microalgas e compõe as proteínas, carboidratos, ácidos nucleicos, vitaminas e lipídeos. O efeito da concentração de dióxido de carbono sobre o crescimento é dado por Kurano e Miyachi (2005):

$$\mu([CO_2]^{(j)}) = \frac{[CO_2]^{(j)}}{K_{CO_2} + [CO_2]^{(j)} + \frac{[CO_2]^{(j)}}{K_{iCO_2}}} \quad (3.40)$$

onde  $K_{[CO_2]}$  é a constante de saturação do dióxido de carbono e  $K_{iCO_2}$  é a constante de inibição.

O nível de oxigênio dissolvido no meio de produção do fotobiorreator pode gerar danos foto-oxidativos nas células e redução da eficiência fotossintética. A inibição do crescimento devido à concentração de oxigênio,  $[O_2]$ , é dado por:

$$\mu([O_2]^{(i)}) = 1 + \frac{K_{O_2}}{[O_2]^{(i)}} \quad (3.41)$$

onde  $K_{[O_2]}$  é a constante inibição do oxigênio.

O nitrogênio é incorporado na síntese de proteínas. O efeito da concentração de íons nitrato  $[NO_3^-]$ , principal forma de fornecimento de nitrogênio, sobre o crescimento é dado por Araújo *et al.* (2009):

$$\mu([NO_3^-]^{(i)}) = \frac{[NO_3^-]^{(i)}}{K_{NO_3^-} + [NO_3^-]^{(i)}} \quad (3.42)$$

onde  $K_{[NO_3^-]}$  é a constante de saturação referente ao íon nitrato.

O efeito da concentração de íons fosfato  $[PO_4^{3-}]$  sobre o crescimento é dado de forma similar ao nitrato. O fósforo está associado à realização de todos os processos que envolvem trocas energéticas nas células como o ATP, açúcares, ácidos nucleicos e fosfoenzimas.

$$\mu([PO_4^{3-}]^{(i)}) = \frac{[PO_4^{3-}]^{(i)}}{K_{PO_4^{3-}} + [PO_4^{3-}]^{(i)}} \quad (3.43)$$

onde  $K_{[PO_4^{3-}]}$  é a constante de saturação referente ao íon fosfato

A variação do pH em culturas de microalgas ocorre devido ao consumo de substratos e à degradação dos metabólitos produzidos. O efeito do pH do meio sobre a taxa de crescimento das microalgas é calculado segundo Pérez *et al.* (2008):



$$\mu(\text{pH}) = \frac{1}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_1} + \frac{K_2}{[\text{H}^+]}} \quad (3.44)$$

onde  $K_1$  e  $K_2$  são as constantes cinéticas e  $[\text{H}^+]$  é a concentração de íons  $\text{H}^+$ .

### 3.5.2.2 Conservação de energia

Aplicando a Lei de Conservação de Energia em cada elemento de volume se obtém:

$$\frac{d\tau^{(i)}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{\tilde{m}^{(i)}} \left\{ \frac{H}{\tilde{c}} (\tau^{(i)} - \tau_p^{(i)}) + \dot{M} (\tau^{(i-1)} - \tau^{(i)}) + \frac{1}{\tilde{c}} \tilde{\gamma}^{(i)} \right\} \quad (3.45)$$

As interações energéticas que ocorrem são o fluxo de calor da parede sólida do tubo, transporte de energia associado ao transporte de massa do fluxo de meio de produção entre os elementos, advecção e, radiação solar transmitida pela parede do tubo, que chega ao meio de produção e é absorvida totalmente,  $\tilde{\gamma}$ . Assim, considera-se que a absorvidade do meio de produção igual a um. O termo difusivo foi desprezado por ser muito menor que os outros termos.

Na parede sólida dos tubos não há transporte de massa. A parede do tubo sofre três interações de transferência de calor: radiação, convecção com o ar exterior e convecção com o meio líquido contido no tubo. A aplicação do balanço de energia na parede do tubo transparente leva à:

$$\frac{d\tau_p^{(i)}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{\tilde{m}^{(i)}} \left\{ \frac{H}{\tilde{c}} (\tau^{(i)} - \tau_p^{(i)}) + \frac{H}{\tilde{c}} (1 - \tau_p^{(i)}) + \frac{1}{\tilde{c}} \tilde{\Gamma}^{(i)} \right\} \quad (3.46)$$

### 3.5.3 Coluna de gaseificação/degaseificação

A literatura apresenta modelos matemáticos que contemplam a dependência espacial no sistema gaseificador/degaseificador (SUGAI, 2012) formulando o problema através de equações diferenciais parciais. Este procedimento é indicado principalmente para análise do componente isoladamente. No entanto, no intuito de analisar o sistema fotobiorreator como um todo, o sistema gaseificador/degaseificador será analisado apenas como componente, assim adota-se uma modelagem matemática simplificada.

Neste modelo, devido ao pequeno tempo de permanência do meio de cultivo dentro do gaseificador/degaseificador, considera-se que a temperatura do meio não é alterada assim como não é alterada a concentração de microalgas. Somente são consideradas as variações de concentração de  $O_2$  e  $CO_2$  devido ao processo de injeção e rejeição de gases (ar).

Para o cálculo da evolução da concentração de  $CO_2$ , utiliza-se a metodologia proposta recentemente por Martínez e Casas (2012) para remoção de  $CO_2$  produzido por motores de submarinos usando colunas de água. Neste trabalho obtém-se a fração mássica de soluto dissolvido no meio, longe das bolhas através de um balanço de massa para o gás:

$$\frac{dy_i}{dt} = \frac{27v_{\text{meio}}D_i u_i}{2gr_0^4} (y_{i,\text{sat}} - y_i) \quad (3.47)$$

onde  $i$  representa tanto  $O_2$  como  $CO_2$ ,  $v_{\text{meio}}$  é a viscosidade do água,  $D_i$  é a difusividade mássica do gás,  $u_i$  é a velocidade de injeção do gás no sistema,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $r_0$  é o raio da bolha de gás que se forma em função da geometria dos orifícios de uma membrana na entrada dos gases na injeção e,  $y_{i,\text{sat}}$  é a fração mássica de saturação do gás na água, que é calculada em função da solubilidade do gás no meio. Os valores usados foram  $8,6 \times 10^{-6}$  kg/kg/bar para  $O_2$  e  $2 \times 10^{-3}$  kg/kg/bar para  $CO_2$  para solubilidade em água. Assim  $y_{i,\text{Sat}} = p_{\text{meio}} S_i / \rho_{\text{meio}}$ .

A EQUAÇÃO 3.38 tem solução analítica. Integrando ao longo do tempo de dissolução da bolha no meio,  $t_d$ . Obtém-se como resultado a fração mássica de gás dissolvido no meio como segue:

$$y_i(t_d) = y_{i,sat} (1 - e^{-Kt_d}) \quad (3.48)$$

onde  $K = \frac{27v_{meio}D_iu_i}{2gr_0^4}$ ,  $t_d = \frac{L_{tdg}}{u_b}$  e  $u_b = \frac{2gr_0^2}{9v_{meio}}$  é a velocidade de elevação da bolha no meio.

A área requerida de seção de tubo gaseificador/degaseificador é determinada por:

$$A_{tdg} = \frac{\dot{m}_{CO_2} t_d}{y_{CO_2} \rho_{meio} L_{tdg}} \quad (3.49)$$

sendo calculada desta forma pois o  $CO_2$  é o gás de interesse em se dissolver no FBR para alimentar o processo de fotossíntese juntamente com a luz solar.

### 3.5.4 Reservatório

O reservatório é modelado como sendo apenas um elemento de volume. Este sistema é termicamente isolado e, portanto, não sofre trocas térmicas com o exterior. Assim, é aplicado apenas o balanço de massa. A entrada do reservatório é conectada à saída do sistema gaseificador/degaseificador. A saída do reservatório, por sua vez, é conectada à entrada do sistema coletor solar (feixe de tubos transparentes).

Neste sistema são calculadas as variações de concentração de microalgas, de  $CO_2$  ( $i=2$ ),  $O_2$  ( $i=3$ ),  $NO_3^-$  ( $i=4$ ) e  $PO_4^{3-}$  ( $i=5$ ) com o uso das EQUAÇÕES 3.34 e 3.35.

### 3.5.5 Cálculo do pH do meio de cultivo

O pH do meio é calculado somente em função da concentração de CO<sub>2</sub> pela formulação proposta por Petrucci *et al.* (2010), conforme segue:

$$\text{pH} = -\log\left(\frac{-k + \sqrt{k_a^2 + 4k_a[\text{CO}_2]}}{2}\right) \quad (3.50)$$

onde  $k_a=4,2 \times 10^{-7}$  é a constante de ionização do CO<sub>2</sub>.

### 3.5.6 Radiação solar

A energia radiante que atinge uma superfície perpendicular aos raios do sol,  $G_n$ , pode ser estimada por:

$$G_n = G_0 \tau_a^m \quad (3.51)$$

onde  $G_0$  é a constante solar,  $\tau_a$  é o coeficiente de transferência para a massa de ar atmosférico e  $m$  é a massa relativa de ar atmosférico. A massa relativa de ar atmosférico é definida como a razão entre o comprimento do caminho verdadeiro e o comprimento do menor caminho possível que a luz solar percorre até atingir o solo.

Quando o sol é visto da terra, o ângulo de zênite varia com a latitude do local, hora do dia e declinação solar. Essas três variáveis são conectadas por (KREITH, 1977):

$$z = \cos^{-1}(\sin\phi \cdot \sin\delta_s + \cos\phi \cdot \cos\delta_s \cdot \cosh) \quad (3.52)$$

Nessa equação,  $z$  (radianos) é o ângulo de zênite,  $\delta$  (radianos) é a declinação solar,  $\phi$  (radianos) é latitude do local de observação ou instalação e  $h$  é o ângulo da hora. Como o ângulo de zênite depende a latitude da instalação, é possível avaliar a influência da localização da planta na performance.

Outro ângulo importante é o azimute. Esse ângulo é formado entre os eixos norte e sul e a projeção do sol na superfície terrestre. Com os ângulos de azimute e zênite podem ser calculados os fatores de forma, os quais afetam o fenômeno da radiação térmica e a radiação fotossinteticamente ativa da seguinte forma:

$$A = \sin^{-1} \left( \frac{\sinh}{\cos(\pi/2 - z)} \cdot \cos \delta_s \right) \quad (3.53)$$

### 3.5.7 Radiação solar direta e difusa em fotobiorreatores compactos

Trabalhos anteriores de Maor e Appelbaum (2011a e 2011b) estudaram a radiação solar tanto direta quanto difusa incidente em fotobiorreatores tubulares. Contudo, os métodos analíticos desenvolvidos não se mostram adequados quando aplicados à arquitetura mais complexa de fotobiorreatores compactos aqui desenvolvidos.

Assim, a necessidade de acessar a quantidade de radiação solar, térmica ou fotossinteticamente ativa, que atinge a superfície de cada tubo do arranjo foi satisfeita desenvolvendo-se um método baseado na técnica de *Ray-Tracing*. Essa técnica foi primeiramente desenvolvida para estudar a trajetória de partículas subatômicas e depois adaptada para uso em computação gráfica. Esse método essencialmente segue o caminho reverso de raio. O ponto de origem do raio é um ponto sobre o diâmetro do tubo, FIGURA 3.6. Este ponto de origem em conjunto com um vetor apontando para o sol representa o raio. Cada tubo pode ser representado num plano transversal ao feixe de tubos pelo raio e pelas coordenadas

do centro de um círculo, ambos conhecidos. Através de geometria analítica, pode se determinar se o raio de luz intercepta outro círculo (representando outro tubo) ou não. Isso determina se esta parte do tubo está sendo iluminada pelo sol ou está na sombra naquele dado momento. Este método foi baseado no trabalho de Lopes (2009).

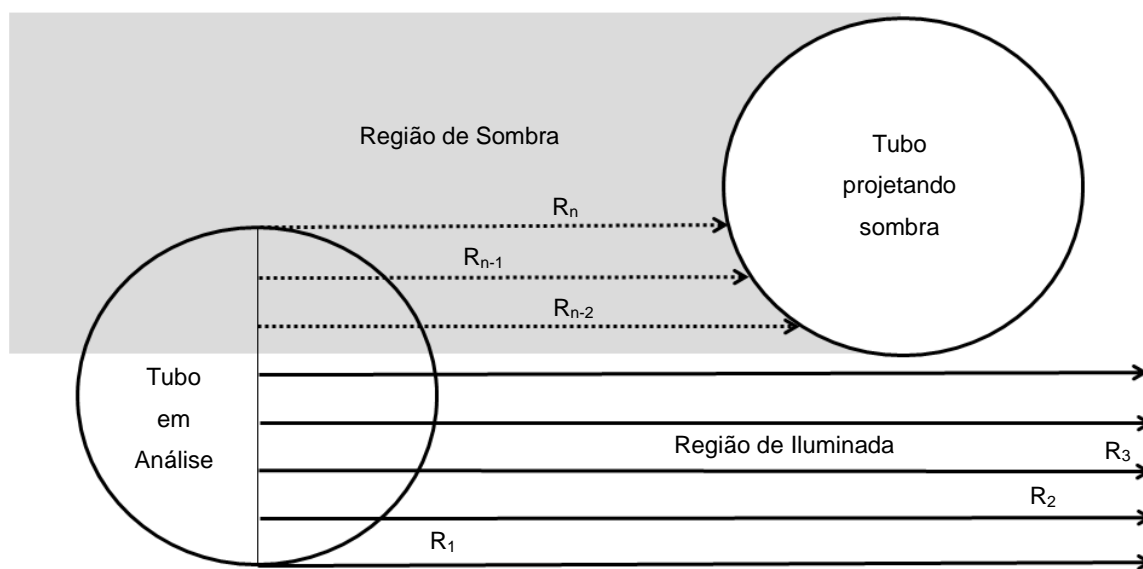


FIGURA 3.6 – DETERMINAÇÃO DE AREAS DE SOMBRA USANDO RAY-TRACING  
 FONTE: O AUTOR (2013)

Desta forma, um raio de luz,  $R_n$ , é representado por uma linha  $\vec{P}(t)$  originada no ponto  $C_0$  e com a direção dada pelo vetor  $V_d$  que aponta para o sol. A linha, na forma paramétrica corresponde a:

$$\vec{P}(t) = \vec{C}_0 + \vec{V}_d t \quad (3.54)$$

Cada tubo precisa ser testado em relação a todos os outros para se determinar se existe pelo menos uma interferência ou não. Se existir ao menos uma interferência do vetor  $V_d$  com outro tubo do arranjo, a parte do tubo em análise correspondente à origem do vetor  $V_d$  está numa região de sombra.

A mesma equação colocada em duas dimensões fica:

$$\begin{cases} x = x_0 + x_d t \\ y = y_0 + y_d t \end{cases} \quad (3.55)$$

Cada tubo do fotobiorreator é representado pela equação do círculo num plano transversal ao arranjo sendo  $x_c$  e  $y_c$  as coordenadas do centro de um outro tubo. O raio do tubos é representado por  $r$ :

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 - r^2 = 0 \quad (3.56)$$

O cruzamento do raio com o círculo se dá para dois pontos correspondentes ao valor do parâmetro  $t$  da equação paramétrica da reta:

$$\begin{cases} t_1 = (2b - \sqrt{d})/2a \\ t_2 = (2b + \sqrt{d})/2a \end{cases} \quad (3.57)$$

onde  $d = (2b)^2 - 4ac$  e  $a$ ,  $b$  e  $c$  definidos por:

$$\begin{cases} a = x_d^2 + y_d^2 \\ b = x_d(x_c - x_0) + y_d(y_c - y_0) \\ c = (x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2 - 2r^2 \end{cases} \quad (3.58)$$

No caso do fotobiorreator, não é necessário determinar os pontos de intersecção. É necessário apenas saber se existe ou não a intersecção. Isso é facilmente determinado pelo cálculo de  $d = (2b)^2 - 4ac$ . Se  $d > 0$  existe raiz para a EQUAÇÃO 3.57 e intersecção e, portanto, a parte do tubo em análise está numa região de sombra. Se  $d < 0$  não existe intersecção a parte tubo em análise está sendo iluminado pelo Sol. Desta forma, após concluído o mapeamento das regiões de sombra, pode-se determinar a radiação solar que incide no tubo. Esta informação é usada posteriormente tanto para a avaliação da quantidade de radiação térmica incidente quanto da radiação fotossinteticamente ativa. Assim, a quantidade de radiação solar  $I_{total}$  que atinge um determinado tubo é dada por:

$$I_{total} = I_{sol\_direta} \cdot FF_{direta} + I_{sol\_difusa} \cdot FF_{difuso} \quad (3.59)$$

onde  $I_{\text{sol\_direta}}$  é a radiação direta proveniente do sol,  $FF_{\text{direta}}$  é o fator de forma entre o tubo em estudo e o sol considerando as sombras projetadas pelos demais tubos do feixe,  $I_{\text{sol\_difusa}}$  é a radiação difusa proveniente do céu avaliada segundo Kreith (1977) e  $FF_{\text{sol\_difuso}}$  é o fator de forma do tubo em estudo contra o céu, ou seja é a proporção de superfície do tubo que 'enxerga' céu, isto é, nunca ficará com sombra.

### 3.6 MÉTODO NUMÉRICO

O modelo matemático produz um sistema de  $n$  (número total de elementos de volume) equações diferenciais ordinárias com o tempo como variável independente, juntamente com as condições iniciais, para a incógnita  $T_i$ , isto é, a temperatura de cada elemento de volume. Uma vez que a temperatura de cada elemento é conhecida, a umidade relativa é calculada imediatamente.

O sistema de equações não estacionário é integrado no tempo, a partir de uma condição inicial dada, explicitamente usando um método de Runge-Kutta/Fehlberg de 4<sup>o</sup>/5<sup>o</sup> ordem (KINCAID, 1994). Se não há interesse na solução transiente, o sistema é resolvido diretamente para a solução em estado estacionário. O termo da derivada em relação ao tempo do sistema de equações diferenciais ordinárias é retirado e um sistema de  $n$  equações algébricas não lineares é obtido. Neste caso as incógnitas são as temperaturas do estado estacionário no centro de cada elemento de volume. O sistema de equações algébricas não lineares é resolvido usando-se um método de Newton-Raphson. O sistema de equações é linearizado com respeito à temperatura no centro da célula, em seguida a umidade relativa é computada. Os métodos foram programados com o uso da linguagem FORTRAN. Importante frisar como um diferencial da modelagem a possibilidade da solução transiente ou estacionária na mesma formulação do problema, i.e., não é necessário modificar o equacionamento do problema para mudar o tipo de solução.



A convergência dos resultados numéricos foi verificada por refinamentos sucessivos de malha (EDITORIAL, 1994) e monitorando a variação da norma Euclidiana da solução numérica em todo o domínio computacional. Contudo, a norma máxima (ou norma infinita) pode também ser usada para reduzir o esforço computacional. Os resultados de uma malha menos refinada (malha 1) são comparados com os resultados de uma malha mais refinada (malha 2), e os refinamentos param quando o critério do erro relativo do refinamento de malha,  $\varepsilon_{\text{malha},i}$ , for satisfeito, então a malha 1 é selecionada como a malha convergida, como se segue:

$$\varepsilon_{\text{malha},i} = \frac{\left| \|\text{var}_i\|_{\text{malha1}} - \|\text{var}_i\|_{\text{malha2}} \right|}{\|\text{var}_i\|_{\text{malha1}}} \leq 0,01 \quad (3.60)$$

em que  $\text{var}_i$  representa as temperaturas calculadas.

Tanto a malha como os resultados numéricos são processados para visualização gráfica em diferentes planos e superfícies. Para tanto, um aplicativo computacional de domínio público produzido pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* foi utilizado (VISIT, 2008), FIGURA 3.7.

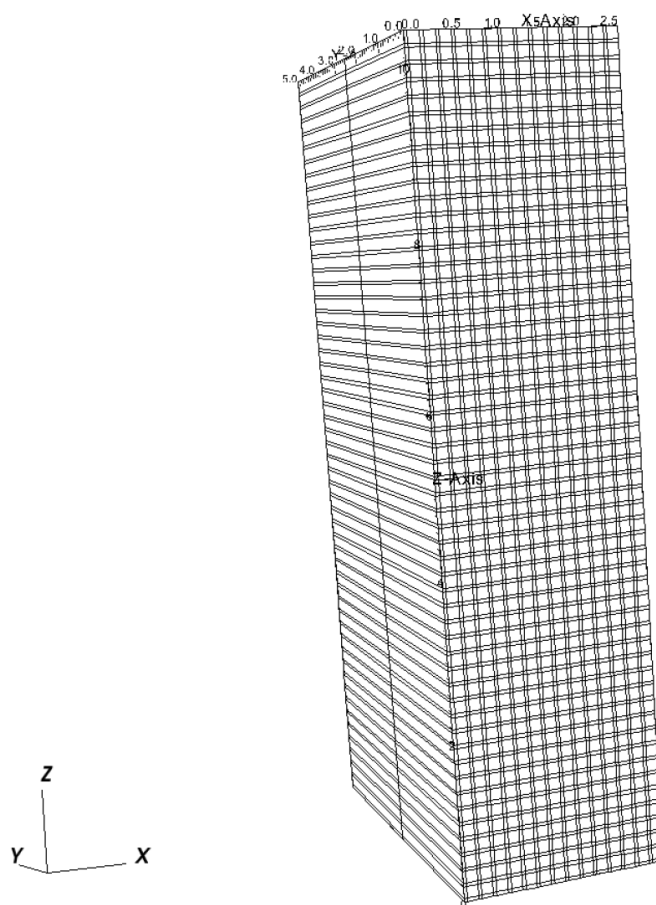


FIGURA 3.7 – MALHA IRREGULAR PARA FOTOBIORREATOR APRESENTADA PELO VISIT  
FONTE: O AUTOR (2013)

### 3.7 GERADOR DE MALHAS CUSTOMIZADO

Um gerador de malha customizado que pode produzir uma malha esparsa representativa de geometrias complexas foi criado. Este gerador pode criar uma malha de grandes equipamentos, como por exemplo um navio, em menos de quatro minutos. O processo foi automatizado e não necessita de intervenções. Este gerador pode gerar malhas de geometrias complexas e com pequeno número de elementos. Este gerador tornou possível ao ESRDC (*Electric Ship Research e Development Consortium*) avaliar várias geometrias de cascos diferentes durante a fase de estudos do futuro navio inteiramente elétrico.

O domínio foi discretizado e foi combinado com modelos físicos simplificados de elementos de volume (VEM) (VARGAS, 2011 e 2012). O aspecto inovador é a geração totalmente automatizada a partir de um formato específico de arquivo CAD. Esta característica eliminou horas de trabalho manual e evitou erros. Todo o procedimento, descrito a seguir, foi programado em FORTRAN. O tempo de execução do procedimento foi menos de quatro minutos e gerou os arquivos de entrada para um programa que resolve o modelo de elementos de volume. O resultado foi visualizado no *software* livre VisIt (VISIT, 2008).

A geração de malha consiste em vários passos. Os passos são: (i) Extrair a informação geométrica de um arquivo CAD de um formato específico; (ii) Gerar um bloco de malha com tamanho suficiente para envolver toda a geometria; (iii) Cruzar o bloco de malha com a informação geométrica do arquivo do CAD para gerar a malha com o formato requerido; (iv) atribuir as propriedades físicas a cada elemento de volume da malha, e (v) escrever os arquivos de saída que servirão como entrada para o programa que solucionará a malha e a visualização no *software* VisIt.

### 3.7.1 Extração da geometria de um arquivo STL

A comunicação entre sistemas de CAD é conhecida por trazer problemas devida às diferentes origens dos sistemas. Para tornar possível a comunicação entre sistemas de CAD e sistemas de prototipagem rápida, foi criado o formato STL. Esse formato de dados consiste em uma lista de faces triangulares. O conjunto de triângulos descreve a superfície tridimensional do modelo geométrico. Tal formato aproxima superfícies tridimensionais de um modelo sólido com triângulos orientados de diferentes tamanhos e formas para atingir uma representação amaciada o suficiente para processamento de peças tridimensionais usando máquinas de estero litografia como mostrado na FIGURA 3.8. O arquivo STL tem a vantagem da estrutura simples e facilidade de uso. O formato binário e texto são ambos

disponíveis. Neste trabalho, o formato texto foi usado no arquivo de entrada do programa em Fortran.

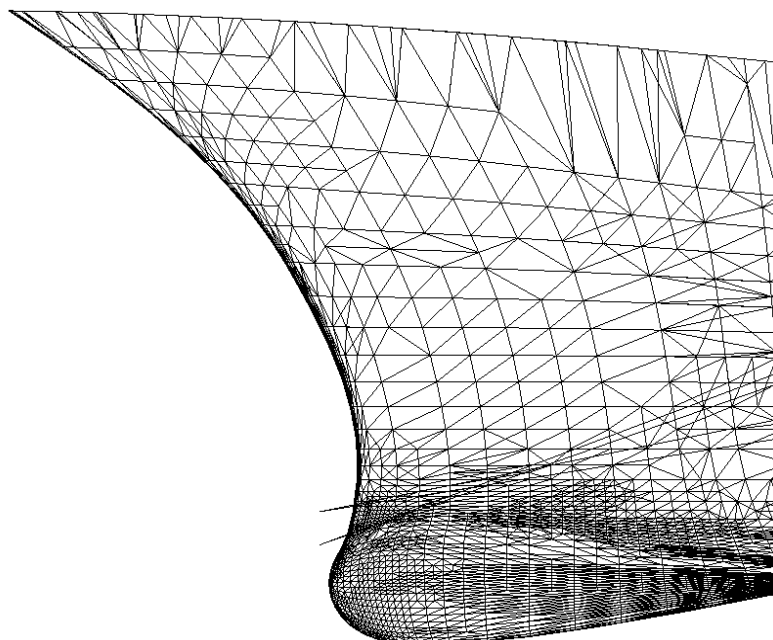


FIGURA 3.8 – DETALHE DO CASCO DE UM NAVIO TIPO DDG-51 REPRESENTADO POR TRIÂNGULOS DE UM ARQUIVO TIPO STL  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

A estrutura do arquivo STL padrão é escrito listando-se todas as facetas do modelo geométrico e escrevendo-se o vetor normal de cada face. O formato de um arquivo STL é o seguinte:

```
solid <name>
facet normal <real><real><real>
outer loop
vertex <real><real><real>
vertex <real><real><real>
vertex <real><real><real>
end loop
end facet
facet normal <real><real><real>
outer loop
.
.
.
end facet
end solid
```

A primeira linha contém o nome do sólido e tem formato caractere. O mesmo arquivo pode conter vários sólidos. A segunda linha contém o vetor normal

normalizado  $(x,y,z)$ . A representação  $\langle \text{real} \rangle$  significa um número no formato real. Entre as declarações *outer loop* e *end loop* as coordenadas dos vértices  $(x,y,z)$  são listadas no sentido horário.

Como os vértices são ordenados no sentido horário, isso determina o vetor normal da face, portanto o vetor normal especificado no arquivo na linha do arquivo STL é redundante, a menos que a face seja muito pequena. Neste caso, a normal calculada a partir dos vértices é imprecisa. Outra deficiência é a falta de coerência entre as faces. Os vértices não são numerados ou identificados, o que significa que é necessário pesquisar por vértices na mesma posição se o modelo precisar ser recriado. Isso toma tempo e é potencialmente perigoso, pois, a posição geométrica dos pontos é imprecisa e é necessário um teste com tolerância para testar a coincidência de pontos. Finalmente, informações tecnológicas, como cor ou material, não podem ser colocadas, pois a relação entre faces não é definida.

Quando o arquivo STL é lido, cada triângulo é numerado e os vértices são escritos numa matriz na memória. O vetor normal também é armazenado. Os nomes dos sólidos também são arquivados para uso posterior.

### 3.7.2 Geração do bloco de malha hexaédrica

A geração de malha começa com a construção de um bloco de malha de elementos hexaédricos. Esse bloco precisa ser grande o bastante para conter toda a geometria a ser representada que pode ser um navio ou outro sistema qualquer.

O primeiro passo é obter as dimensões do sólido nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Isso é feito pesquisando-se os valores extremos de  $x$ ,  $y$  e  $z$  na lista de triângulos extraída do arquivo STL. Desta maneira,  $x_i$ ,  $x_f$ ,  $y_i$ ,  $y_f$ ,  $z_i$  e  $z_f$  são agora conhecidos e os subscritos  $i$  e  $f$  significam inicial e final. Assim, o tamanho do bloco de malha

envolvente a ser criado é  $L_x = x_f - x_i$ ,  $L_y = y_f - y_i$ , e  $L_z = z_f - z_i$ , onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  representam as direções respectivamente.

O número de elementos em cada direção é arbitrário para a primeira malha, similarmente a qualquer outro método. Então a malha é sucessivamente refinada até a convergência ser estabelecida de acordo com um critério pré-estabelecido baseado no problema em análise.

O bloco de malha tem um padrão regular de nós e elementos, podendo ser irregular em aplicações específicas como fotobiorreatores. Ele é composto de elementos de volume tridimensionais, cada um com oito nós. Cada elemento é localmente numerado com pontos nodais seguindo a regra da mão direita como indicado na FIGURA 3.9.

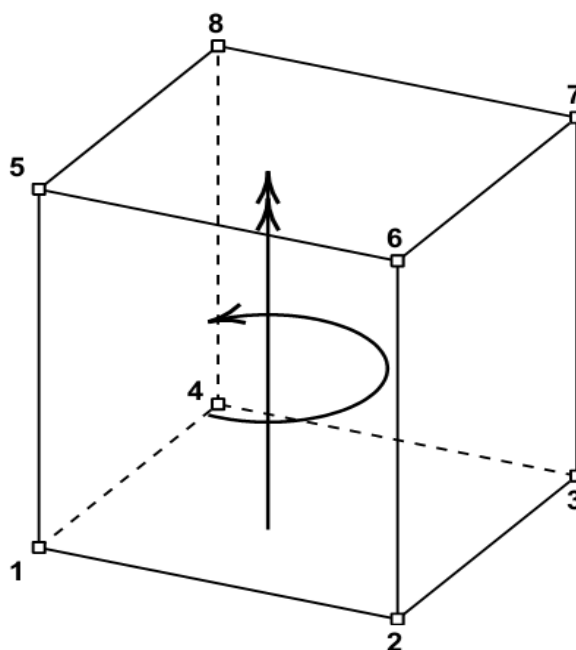


FIGURA 3.9 – REGRA DA MÃO DIREITA NUMERANDO OS ELEMENTOS TRIDIMENSIONAIS DE OITO NÓS  
 FONTE: FEAP (2011)

Como resultado, uma malha de elementos tridimensionais de oito nós é criada como mostrado na FIGURA 3.10. Este bloco envolve a geometria do arquivo STL e será usado no próximo passo da criação da malha com formato real.

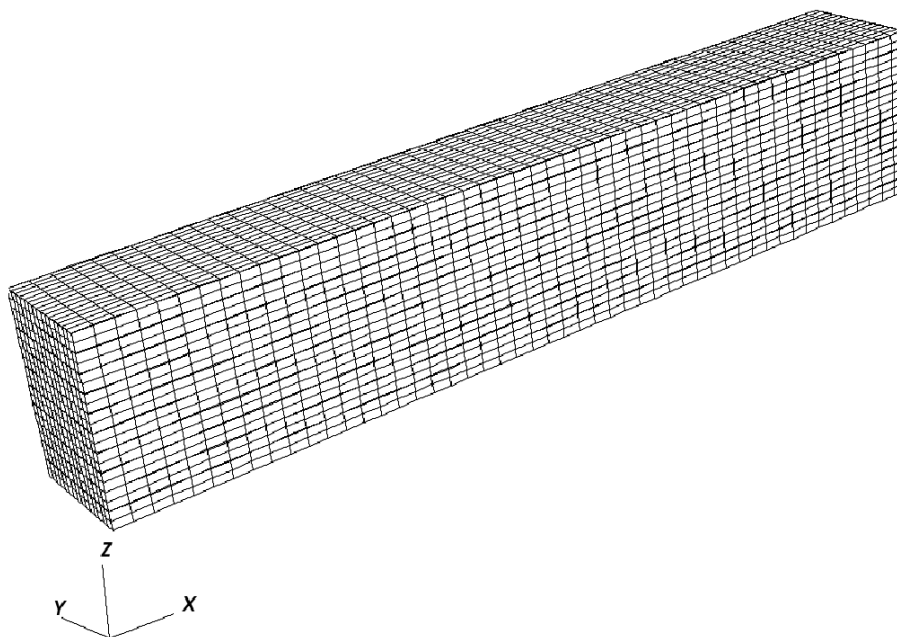


FIGURA 3.10 – BLOCO INICIAL DE ELEMENTOS TRIDIMENSIONAIS DE OITO NÓS.  
FONTE: DILAY *et al.*, (2012)

### 3.7.3 Malha com formato real

Após o bloco que envolve toda a geometria do contorno ter sido criado anteriormente com as informações extraídas do arquivo STL, o próximo passo é eliminar os elementos que não estão contidos dentro da geometria deste contorno. Para fazer isso, um algoritmo é necessário para testar todos os elementos da malha e verificar quais estão dentro e quais estão fora do contorno.

O algoritmo é uma combinação de vários conceitos de computação gráfica, i.e.: (i) *Ray Tracing*, (ii) Intersecção de raio e triângulo, e (iii) raio cruzando sólido. O algoritmo consiste em desenhar um segmento de reta a partir de cada centro de elemento de malha em uma direção arbitrária. O elemento está dentro ou fora do contorno do navio se o número de triângulos do arquivo STL cruzados pelo segmento de reta for ímpar ou par (O'ROURKE, 1998) respectivamente. O princípio é demonstrado na FIGURA 3.11 com um polígono de 27 lados através do qual a técnica é explicada em detalhes.

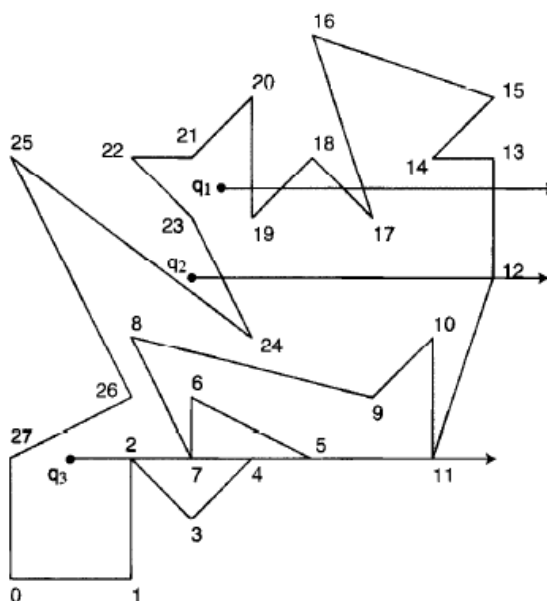


FIGURA 3.11 – RAIOS CRUZANDO UM POLIGONO DE 27 LADOS  
FONTE: O'ROURKE (1998)

Os objetos são representados por seus vértices, um segmento de reta por seus extremos, um raio por segmento estendido e um triângulo por seus três vértices. Retas são representadas pela sua equação paramétrica:  $P(r) = P_0 + r(P_1 - P_0)$ , a qual também é usada para o ponto de início de um raio em  $P_0$  indo na direção  $(P_1 - P_0)$ , e para o segmento de  $P_0$  para  $P_1$ . Um plano é dado por um ponto  $V_0$  contido nele e pelo vetor normal  $\mathbf{n}$  (SUNDAY, 2001).

A intersecção de uma linha ou raio  $\mathbf{L}: P(r) = P_0 + r(P_1 - P_0)$  e o plano  $\pi$  ocorre no ponto  $P(r_i)$  com o seguinte valor do parâmetro:

$$r_i = \frac{\mathbf{n} \cdot (V_0 - P_0)}{\mathbf{n} \cdot (P_1 - P_0)} \quad (3.61)$$

De acordo com a FIGURA 3.12, considerando um raio  $\mathbf{R}$  (ou um segmento  $\mathbf{S}$ ) de  $P_0$  para  $P_1$ , e um triângulo  $T$  com vértices  $V_0$ ,  $V_1$  e  $V_2$ . O triângulo  $T$  está contido no plano  $\pi$  pela relação  $V_0$  com vetor normal  $\mathbf{n} = (V_1 - V_0) \times (V_2 - V_0)$ . Para se obter a intersecção de  $\mathbf{R}$  (ou  $\mathbf{S}$ ) e  $T$ , primeiro a intersecção de  $\mathbf{R}$  (ou  $\mathbf{S}$ ) e  $\pi$ . Se não existe essa intersecção, então o raio (ou segmento) também não intercepta  $T$ . Contudo, se ele intercepta no ponto  $P_i = P(r_i)$ , é necessário determinar se esse ponto está dentro do triângulo  $T$ .



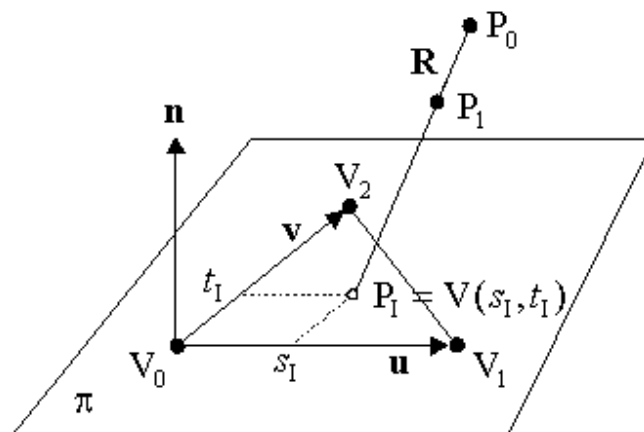


FIGURA 3.12 – INTERSECÇÃO RAIÓ-TRIÂNGULO  
FONTE: SUNDAY (2001)

Existem várias maneiras de testar a inclusão de um ponto dentro de triângulo 3D plano. Aqui é usado o método apresentado por Sunday, 2001. O método usa cálculos tridimensionais diretos para determinar a inclusão do ponto, evitando projeções em um plano de coordenadas bidimensionais. Como resultado, o código é limpo e compacto. Coordenadas paramétricas são calculadas a partir da equação paramétrica do plano como segue:

$$V(s,t) = V_0 + s(V_1 - V_0) + t(V_2 - V_0) = V_0 + su + tv \quad (3.62)$$

onde  $s$  e  $t$  são números reais, e  $u = (V_1 - V_0)$  e  $v = (V_2 - V_0)$  são os vetores das arestas de  $T$ . Um ponto  $P = V(s,t)$  está no triângulo quando  $T$  quando  $s \geq 0$ ,  $t \geq 0$  e  $s + t \leq 1$ . Então, dado  $P_i$ , somente é necessário achar  $(s_i, t_i)$  coordenadas para este ponto, e então verificar as condições acima. Ainda, um ponto  $P = V(s,t)$  está numa aresta de  $T$  se uma das condições  $s=0$ ,  $t=0$  ou  $s+t=1$  for verdadeira. Também, os três vértices são dados por:  $V_0 = V(0,0)$ ,  $V_1 = V(1,0)$  e  $V_2 = V(0,1)$ .

A solução para  $s$  e  $t$  é dada por:

$$s = \frac{w \cdot (n \times v)}{u \cdot (n \times v)} \text{ e } t = \frac{w \cdot (n \times u)}{v \cdot (n \times u)} \quad (3.63)$$

onde  $w = (P_1 - V_0)$  é outro vetor em  $\pi$ . O algoritmo foi fornecido pelo autor numa implementação em C++ (SUNDAY, 2001). Neste trabalho, a implementação foi convertida para Fortran. O código original pode ser livremente usado e modificado para qualquer propósito citando-se o *copyright* para a empresa softSurfer ([www.softsurfer.com](http://www.softsurfer.com), 2001).

Neste ponto, o bloco de malha, os triângulos do contorno e o algoritmo para localizar se um elemento está dentro ou fora do contorno geométrico estão disponíveis. Neste trabalho, um raio é desenhado a partir de cada centro de elemento numa direção arbitrária. A direção selecionada arbitrariamente é do eixo Y por simplicidade. O número de triângulos que são cruzados pelo raio é calculado. Se o número é ímpar, o elemento está dentro do contorno, senão, está fora. Essa parte do algoritmo tem um grande custo em termos de tempo computacional por causa do grande número de iterações. Por exemplo, um bloco com 30.000 elementos para ser cruzado com 30.000 triângulos no contorno precisa de  $30.000^2$  operações para atingir a malha final.

Depois da definição da lista de elementos que estão fora do contorno geométrico, estes elementos precisam ser eliminados. Os nós não utilizados também precisam ser eliminados. O processo de limpeza é acompanhado da renumeração dos nós e dos elementos. Então, a tabela com os nós e elementos finais terá uma numeração contínua.

Como cada elemento irá interagir com os elementos adjacentes, de acordo com a Lei de Conservação de Energia (Primeira Lei da Termodinâmica), pra cada elemento é necessário identifica a sua vizinhança. Para fazer isso, o programa pesquisa elemento a elemento os vizinhos nas posições norte, sul, leste, oeste, topo e fundo.

#### 3.7.4 Propriedades físicas dos elementos

Um elemento representa um volume de controle que consiste em contorno contendo tanto um fluido (exemplo, ar), e/ou sólidos, isto é, paredes ou equipamentos. As estratégias de resfriamento dos equipamentos incluem uso de água fresca (doce), ar condicionado e água do mar (caso de navio).

Os equipamentos são colocados em um ou mais elementos de volume de acordo com as suas dimensões. O procedimento foi desenhado para iniciar com as coordenadas x, y e z de um equipamento particular e então comparado com as coordenadas do ponto central de todos os elementos da malha para determinar em quais elementos o equipamento deve ser alocado. Pequenos equipamentos são agrupados para que ocupem pelo menos um elemento de volume.

No caso de simulação do navio, para se considerar componentes diferentes suas estratégias de resfriamento, seis tipos de elemento de volume foram definidos com base em seus conteúdos: 0) somente ar; 1) sólido puro, 2) trocador de calor com água do mar, 3) unidade de água gelada, 4) sistema refrigerado por água doce, e 5) sistema refrigerado por água do mar

O navio é dividido em várias zonas. Cada zona é refrigerada separadamente, com uma combinação de estratégias de ar condicionado, água doce e água do mar. Cada zona tem um trocador de calor usando água do mar (SWHX), uma unidade de água gelada (CWU) e um conjunto de bombas. A água circula um sistema fechado coletando calor dos sistemas da zona.

Do ponto de vista de projeto térmico, todos os equipamentos tem informações sobre geração de calor, áreas de troca térmica, calor específico, massa específica, vazão de água de resfriamento e condutância térmica. Essas informações são atribuídas pelo programa a cada elemento correspondente da malha.

### 3.7.5 Arquivos de saída

Como resultado, o procedimento descrito anteriormente tem três tipos diferentes de arquivos de saída. Um deles é destinado à visualização usando o formato VTK (*Visualization Toolkit*) no software VisIt (VISIT, 2008). O segundo tem as informações sobre as propriedades de cada elemento de volume. O terceiro e último

tem a lista de coordenadas dos nós, a lista de elementos de volume e a lista de elementos adjacentes de cada elemento. Os segundo e terceiro arquivo são usados como arquivos de entrada do programa que resolverá o modelo matemático.

## 4 EXPERIMENTOS

### 4.1 CONVERTOR PEBB

A caracterização térmica de conversores de potência eletrônicos do tipo PEBB (*Power Electronic Building Block*) é usada no estudo de estratégias de resfriamento destes componentes. Entre os pontos de interesse está o calor dissipado e o campo de temperatura no interior do gabinete. Ambos afetam o desempenho e a confiabilidade das instalações e estão relacionadas entre si pelo conceito de condutância térmica. Desta forma, é importante o desenvolvimento e validação de uma ferramenta computacional que possa prever a condutância térmica e o campo de temperatura no interior do equipamento em estudo.

O levantamento de dados experimentais foi feito para fins de comparação com resultados numéricos, ajuste e validação do modelo matemático. Os testes foram conduzidos no laboratório do CAPS-FSU, *Center for Advanced Power Systems – Florida State University*.

Foram conduzidos dois testes visando caracterizar termicamente um conversor de potência eletrônico. O primeiro teste foi realizado em triplicata visando à análise de incertezas e foi usado para validação do modelo matemático. O segundo teste foi realizado com metade da corrente inicial e foi usado para ajustar o modelo matemático.

Os resultados contem incertezas intrínsecas ao processo experimental, que devem ser quantificadas. Com as medições em triplicata foi calculado o limite de precisão como sendo o dobro do desvio padrão das referidas medições, com grau de confiança de 95%, assumindo que os erros seguem uma distribuição normal. Os critérios de propagação de erros em medições experimentais seguem os padrões ASME (KIM, SIMON e VISKANTA, 1993).

#### 4.1.1 Descrição da unidade experimental PEBB

O conversor de fase controlada usado era composto por tiristores de 150 Amperes, capacitores, indutores e fusíveis. O conjunto foi montado num gabinete medindo 0,91 x 0,47 x 0,67 metros como mostra a fotografia da FIGURA 4.1. O resfriamento foi feito por um ventilador da marca Dayton com vazão máxima de 0,1128 m<sup>3</sup>/s.

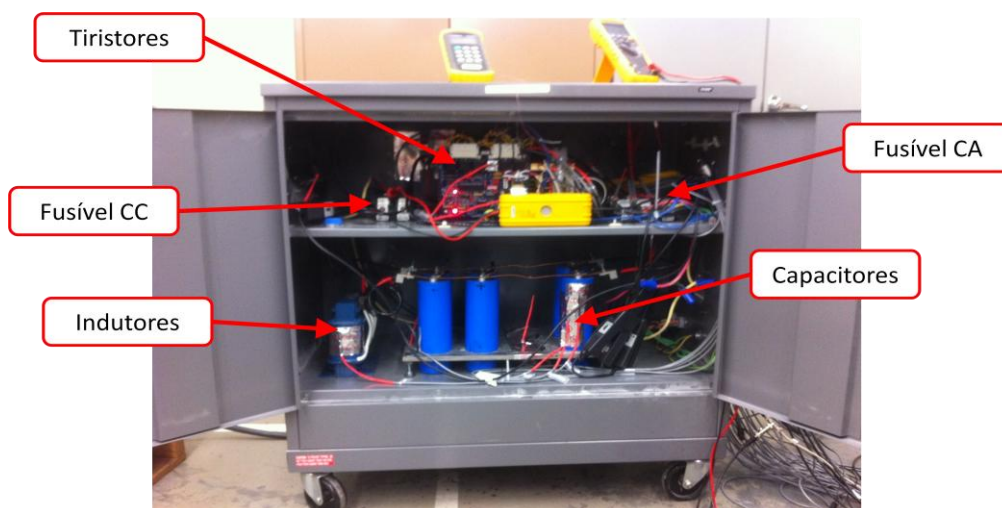


FIGURA 4.1 – GABINETE DO CONVERSOR  
FONTE: DILAY *et al.* (2013)

A carga usada foi um banco de resistências elétricas composto por três resistências de 4,6 Ohms cada mostrado na fotografia da FIGURA 4.2. Por meio deste banco toda a potência elétrica gerada pelo conversor foi dissipada para o ar do ambiente.



FIGURA 4.2 – BANCO DE RESISTÊNCIAS USADO COMO CARGA  
FONTE: DILAY *et al.* (2013)

Um sistema de aquisição de dados da *National Instruments* em conjunto com o *softwareLabView 8.2* foi usado para monitorar os testes e registrar os dados em arquivo, FIGURA 4.3. As placas do sistema de aquisição de dados usados foram: NI PXI 1010 – *Chassis*, SCXI-1102 - *Filter 2 Hz*, SCXI-1581 – *Current Source*, PXI-6251 – *Data Acquisition*, PXI-6133- *Waveform Capture*, PXI-6251 – *Voltage Output*. As grandezas foram medidas em 26 pontos de temperatura, 5 pontos de corrente elétrica e 4 pontos de diferença de potencial elétrico.



FIGURA 4.3 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS  
FONTE: DILAY *et al.* (2013)

Termistores de alta precisão do tipo 44004RC, ponta padrão tipo I, com diâmetro máximo de 2,4mm, foram utilizados para medição de temperatura. Os

termistores foram imersos em um banho com temperatura constante, e 64 medições de temperatura foram feitas em 20°C, 30°C, 40°C, ..., 80°C. O maior desvio padrão dessas medições foi 0,0006°C, portanto o limite intrínseco foi considerado  $\pm 0,0012^\circ\text{C}$  para todos os termistores. Um termômetro HH506R fabricado pela Omega Inc. foi usado para medir a temperatura do ar externo. A lista completa da instrumentação utilizada e especificações correspondentes é mostrada na TABELA 4.1.

TABELA 4.1 – LISTA DE INSTRUMENTOS USADOS NA AQUISIÇÃO DE DADOS

INSTRUMENTO	FABRICANTE	MODELO	PRECISÃO
Voltímetro	Probe Master	4232	2%
Voltímetro	Lecroy	AP031	2%
Multímetro	Fluke	179	0,09%
Anemômetro de Fio Quente	Omega	FMA900A	2%
Termômetro	Omega	HH506R	0,05%
Termistores	Measur. Specialties	44004RC	0,001°C
Medidor de Vazão de Ar	Fluke	922	2,5%

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

Os 26 pontos de leitura de temperatura foram escolhidos de modo a representar a temperatura de cada componente analisado e também do ar no interior do gabinete. A TABELA 4.2 mostra o número de identificação de cada termistor, o local da instalação e também as coordenadas medidas a partir do canto inferior frontal esquerdo do gabinete.



TABELA 4.2 – LISTA DE TERMISTORES

TERMISTOR NÚMERO	COMPONENTE	POSIÇÃO (cm) (x,y,z)
1	Capacitor 1 Pos. 1	(58,17,9)
2	Capacitor 1 Pos. 2	(59,16,15)
3	Capacitor 1 Pos. 3	(62,15,18)
4	Capacitor 2	(26,28,17)
5	Ar, compartimento inferior	(53,24,18)
6	Ar, saída do ventilador	(5,21,46)
7	Fusível CC	(18,29,40)
8	Cabo CC	(19,16,38)
9	Capacitor 1 Pos 4	(35,38,41)
10	Resistor	(35,38,47)
11	Indutor, Pos. 1	(48,16,42)
12	Transformador	-
13	Dissipador Pos. 1	(32,30,49)
14	Dissipador Pos. 2	(52,27,49)
15	Dissipador Pos. 3	(59,26,49)
16	Cabo CA L3	(69,33,47)
17	Fusível CA L3	(80,22,40)
18	Parede Interna	(27,46,48)
19	Ar, entradat	(91,24,46)
20	Não utilizado	-
21	Parede externa	(33,47,49)
22	Ponte de tiristores	(47,29,52)
23	Indutor, Pos. 2	(10,11,9)
24	Ar, compartimento inferior	(79,24,22)
25	Ar, compartimento superior, pos. 1	(78,28,50)
26	Ar, compartimento superior, pos. 2	(17,19,53)

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

#### 4.1.2 Análise das incertezas experimentais no teste PEBB

O cálculo das incertezas experimentais é essencial para uma adequada avaliação dos resultados obtidos. Através de medições de temperatura durante a evolução transiente do sistema e em condições de estado estacionário, é necessário validar os resultados numéricos obtidos com o modelo matemático. Tais resultados contém incertezas devido ao processo de medição e instrumentação que precisam ser quantificados.

A média das medições tomadas dos três repetições do teste com os termistores de alta precisão listados na TABELA 4.2, tipo de cabeça padrão I, com diâmetro máximo de 2,4 mm, foi utilizada para estimar a temperatura em cada ponto dentro do gabinete. O limite de precisão foi calculado como duas vezes o desvio padrão das repetições do teste assumindo que a população segue uma distribuição simétrica unimodal normal, dentro de um intervalo de confiança de 95% (LIPSCHUTZ *et al.*, 2000).

Neste trabalho, as incertezas das medições de temperatura foi estimada de acordo com o critério padrão da American Society of Mechanical Engineers, ASME (EDITORIAL, 1994). As incertezas das medições de temperatura são, desta forma, obtidas como segue:

$$U_T = \sqrt{B_T^2 + P_T^2} \text{ ou } \frac{U_T}{T} = \sqrt{\frac{P_T^2}{T} + \frac{B_T^2}{T}} \quad (4.1)$$

onde  $B_T$  é o limite intrínscico, e  $P_T$  é o limite de precisão, isto é  $2\sigma_T$ . Portanto,  $U_T$  é a incerteza das medições de temperatura.

#### 4.1.3 Procedimento experimental

Dois testes experimentais foram conduzidos no laboratório. Os testes foram realizados em triplicada exatamente nas mesmas condições de corrente e potência visando avaliar a variabilidade das leituras e possibilitar a análise de incertezas e a construção de barras de erro. As condições usadas foram a uma corrente contínua de 40 A, numa diferença de potencial de 279 V o que gerou a potência total a ser dissipada como calor no banco de resistências de 11,116 kW. O segundo teste, usou uma potência de 4,8 kW, 200V e 24 A de corrente contínua.

O teste começou com o PEBB em completo equilíbrio térmico com o ambiente externo, o qual foi controlado em  $T_{\infty}=296\pm 0,2\text{K}$ . O equipamento foi ligado diretamente na potência de 11,116 kW ou 4,8 kW e vazão volumétrica do ventilador foi de  $0,08\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . A resposta transiente até o regime estacionário foi monitorado com taxa de amostragem a 1 s através do sistema de aquisição de dados. Após o teste, o equipamento foi resfriado com o uso de ventiladores até atingir o equilíbrio térmico com o ambiente. Todo o procedimento de teste foi repetido três vezes.

## 4.2 FOTOBIORREATOR

Foram desenvolvidos no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Auto-Sustentável (NPDEAS) da Universidade Federal do Paraná fotobiorreatores tubulares compactos para crescimento de biomassa de microalgas para produção de biodiesel em escala piloto (VARGAS, 2007). Os avanços se deram principalmente na complementação do fotobiorreator número 1, já existente, assim como na construção de um novo tanque de propagação. Também foi construído um minifotobiorreator destinado a obtenção de dados para validação do modelo computacional. Além disso, foram construídos os fotobiorreatores números 2 e 3. Estes novos fotobiorreatores incorporam melhorias desenvolvidas durante o uso do fotobiorreator número 1. Estes equipamentos estão hoje patenteados no Brasil sob número BR1020130263958 e nos Estados Unidos da América sob número WO2012050608.

#### 4.2.1 Fotobiorreator em escala piloto

O sistema fotobiorreator consiste em 3.710 metros de tubos transparentes de PVC com proteção contra radiação ultra-violeta (UV), distribuídos em uma geométrica compacta, com 14 colunas e 53 linhas de tubos, no total de 742 tubos, conforme mostra a FIGURA 4.4, onde cada tubo tem 5 metros de comprimento com um diâmetro interno de 0,05m. Este fotobiorreator é considerado compacto por ter capacidade de aproximadamente 10.000 litros de meio de cultivo de microalga utilizando apenas 10 m<sup>2</sup> de área construída. Outro ponto fundamental deste fotobiorreator é a sua grande área lateral de 122 m<sup>2</sup> que fica exposta à luz solar, parâmetro este de suma importância para o crescimento da cultura.

O sistema de circulação do meio de produção é composto por uma bomba centrífuga. Esta bomba apresenta potência de 0,5 CV. A troca de gases, ou seja, introdução de gás carbônico, necessário ao crescimento da microalga, e eliminação de oxigênio, gerado no processo de fotossíntese é feita injetando-se ar comprimido num sistema difusor (gaseificador/degaseificador).



FIGURA 4.4 – FOTOBIORREATOR N° 1 DESENVOLVIDO PELO NPDEAS-UFPR-CURITIBA-BRASIL  
FONTE: O AUTOR (2011)

#### 4.2.2 Tanque de propagação

A inoculação de um fotobiorreator exige uma concentração mínima de células. Devido ao grande volume de meio de cultivo necessário para se preencher todo o fotobiorreator, é necessário um grande volume de inóculo. Contudo, a produção deste inóculo em sala de cultivo dentro de laboratório fica limitada a pequenas quantidades. Desta forma, é necessário um processo intermediário entre a produção de inóculo em laboratório e a introdução de inóculo no fotobiorreator. Este processo, chamado de propagação, visa aumentar o volume de inóculo até a quantidade suficiente para garantir a concentração mínima de células para partida do fotobiorreator.

O tanque de propagação, FIGURA 4.5, como indica o próprio nome, visa aumentar a quantidade de inóculo disponível. Este tanque possui volume de 500 litros úteis. Sobre ele foi montado um sistema de iluminação para que o crescimento da alga seja feito durante o período noturno tanto quanto no diurno. A troca de gases é realizada por dispositivo difusor instalado no fundo do tanque no qual é injetado ar comprimido. Também existe a possibilidade de se instalar uma cobertura de plástico transparente para proteger o cultivo das intempéries.



FIGURA 4.5 – TANQUE DE PROPAGAÇÃO  
FONTE: O AUTOR (2011)

#### 4.2.3 Mini-fotobiorreator

A validação de modelos computacionais requer dados coletados em experiências realizadas em condições controladas. Os fotobiorreatores de grande porte são montados em ambientes externos, os quais estão sujeitos aos elementos como chuva, vento, variações de temperatura atmosférica. Esta característica dificulta a obtenção de dados em situação totalmente controlada. Assim, é necessário um equipamento que possa ser utilizada em uma câmara com variáveis controladas. Desta forma é possível obter dados específicos que podem ser usados em comparações com resultados de modelos computacionais e conseqüentemente possibilitam validações experimentais.

Neste intuito, foi construído um pequeno fotobiorreator, FIGURA 4.6, que pode ser instalado dentro de uma sala de cultivo. Este reator funciona com o princípio de *air-lift*, e opcionalmente bomba centrífuga. É constituído por um arranjo de 30 tubos de PVC transparente de 60 mm de diâmetro e volume aproximado de 100 litros de meio de cultivo. Existe um sistema de iluminação artificial composto por vinte lâmpadas fluorescentes tubulares de 30 Watts montadas nas laterais. Este mini-fotobiorreator também pode ser utilizado em experimentos ao ar livre e com iluminação solar.

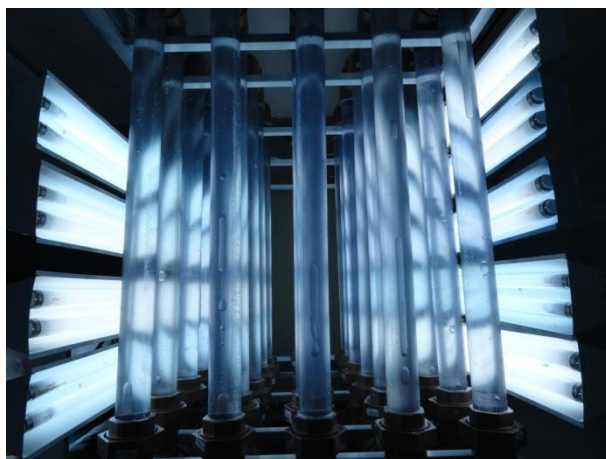


FIGURA 4.6 – MINI-FOTOBIORREATOR  
FONTE: O AUTOR (2011)

#### 4.2.4 Análise de incertezas experimentais

Uma análise de incertezas experimentais é essencial para a adequada avaliação dos resultados obtidos. Por intermédio de medidas de contagem de número de células no cultivo de microalgas no FBR mostrado na FIGURA 4.4, localizado no NPDEAS da UFPR, busca-se validar experimentalmente os resultados numéricos do presente trabalho para crescimento da microalga *Scenedesmus sp.*

Esses resultados contêm incertezas intrínsecas ao processo experimental, que devem ser quantificadas.

Todas as medidas foram tomadas em triplicata. O limite de precisão foi computado como sendo o dobro do desvio padrão das referidas medições, com grau de confiança de 95%, assumindo que a população segue uma distribuição normal. Os critérios de propagação de erros em medições experimentais seguem os padrões ASME (KIM, SIMON e VISKANTA, 1993).

#### 4.2.5 Procedimento experimental

Um cultivo em fotobiorreator em grande escala realizado com o objetivo de colher dados sobre crescimento celular de microalgas para serem posteriormente comparados aos resultados do modelo matemático é descrito a seguir.

Primeiramente o fotobiorreator foi limpo através da circulação de água para remoção de contaminantes tais como resíduos de microalgas de cultivos anteriores, bactérias e outros sólidos. A seguir uma esponja de polietileno expandido é forçada pelo interior dos tubos para remoção de material aderido às suas paredes.

O fotobiorreator é então preenchido com uma solução saturante de nutrientes (meio Chu) necessários para o crescimento da microalga. Desta forma, o crescimento microalgal não será inibido por falta de alguma substância importante. O meio de produção é a base do inóculo. A ele é acrescentada uma quantidade inicial de microalgas.

Este inóculo é propagado em um tanque de 2 m<sup>3</sup> de volume para concentração passar da faixa de 0,05-0,10 g/l para 0,20-0,30 g/l. Isto ocorre no intervalo de 7 dias. Após a propagação, o conteúdo é bombeado para o fotobiorreator e diluído até atingir o volume de 10 m<sup>3</sup>. Nesta fase, a produção propriamente dita é iniciada e dia a dia a concentração de microalgas aumenta. A



coleta de dados é feita manualmente e registrada para posterior análise. Os dados coletados diariamente são: concentração de microalgas via contagem de células, pH, temperatura ambiente, temperatura do meio e irradiação solar.

A FIGURA 4.7 mostra o trabalho de correlação entre o número de células por unidade de volume em um meio de cultivo retirado do FBR e sua concentração em  $\text{g L}^{-1}$ . A estratégia foi a de primeiro contar as células, em seguida obter a biomassa seca e por pesagem direta relacionar as duas grandezas. O resultado permitiu a obtenção de uma reta ajustada do comportamento observado em várias contagens, através de regressão linear, obtendo um coeficiente de correlação de  $R^2=0,95573$ , o que pode ser considerado representativo do comportamento dos pontos.

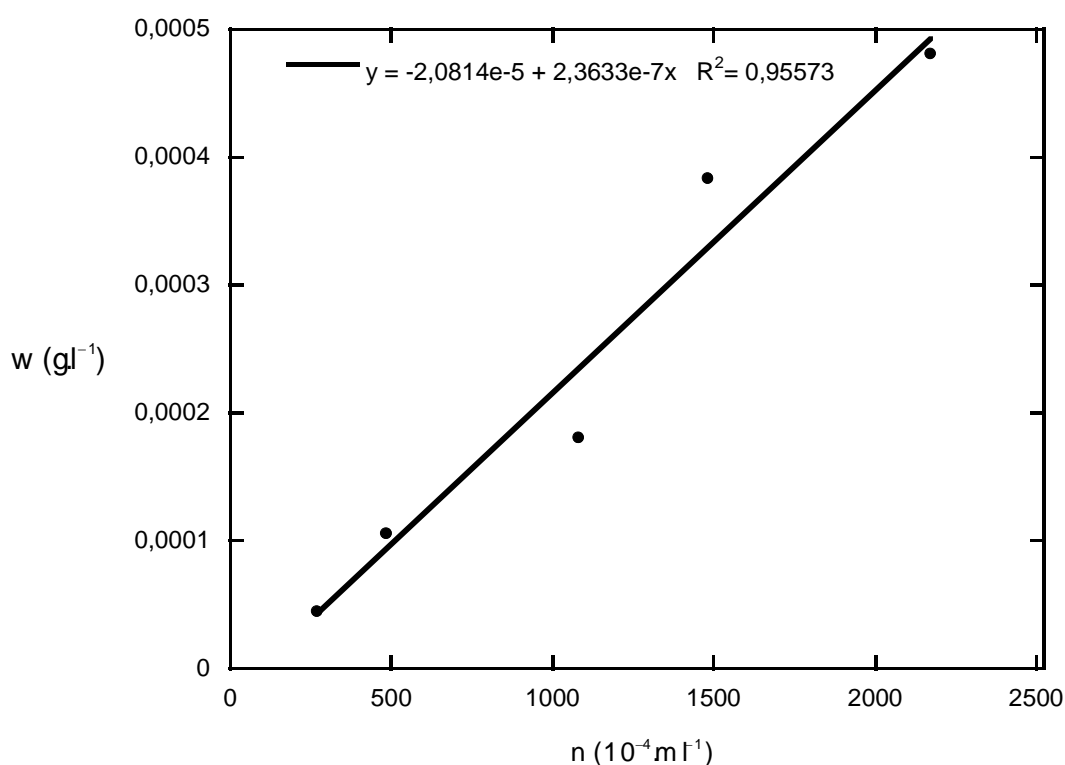


FIGURA 4.7 - CORRELAÇÃO ENTRE BIOMASSA SECA E NÚMERO DE CÉLULAS POR ML OBTIDA POR MEIO DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS E REGRESSÃO LINEAR.  
FONTE: adaptado CORRÊA, 2013

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 MODELO PEBB

Nesta seção, o comportamento do PEBB é estudado experimental e numericamente. Primeiro, a resposta térmica do regime transiente e estacionário medida é analisada. As medições experimentais são usadas para experimentalmente validar os resultados numéricos obtidos com o modelo matemático apresentado anteriormente, usando dois diferentes conjuntos de dados obtidos pelo PEBB mostrado na FIGURA 4.1 para dois diferentes ajustes de potência. O procedimento consiste em resolver o problema inverso de estimativa de parâmetros para verificar e ajustar, se necessário, densidades equivalentes estimadas, calores específicos, superfícies de transferência de calor, ou condutividades térmicas para os componentes, então ajustando o modelo matemático usando um conjunto de dados do ajuste de potência, isto é, 4,8 kW. Após isso, as condições correspondentes a outros conjuntos de ajuste, isto é, 11,12 kW são computacionalmente simulados com o modelo ajustado para verificar a concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Finalmente, o modelo validado experimentalmente é usado para investigar a condutância térmica global do sistema.

#### 5.1.1 Resposta térmica transiente e estacionária experimental do PEBB

A análise realizada neste item é conduzida com o ajuste de potência em 11,12 kW. A condição inicial do PEBB varia levemente nas três corridas, isto é, entre

296 e 297 K. A temperatura representativa de um componente em particular e do ar interno é definida como a média aritmética de todas as temperaturas medidas pelos termistores instalados no componente ou no ar interno (quatro termistores). Desta maneira, uma média de temperatura instantânea foi disponibilizada para cada componente e o ar interno. A evolução temporal das temperaturas medidas é mostrada na FIGURA 5.1 e 5.2. As curvas mostradas são também a média das três repetições de cada teste.

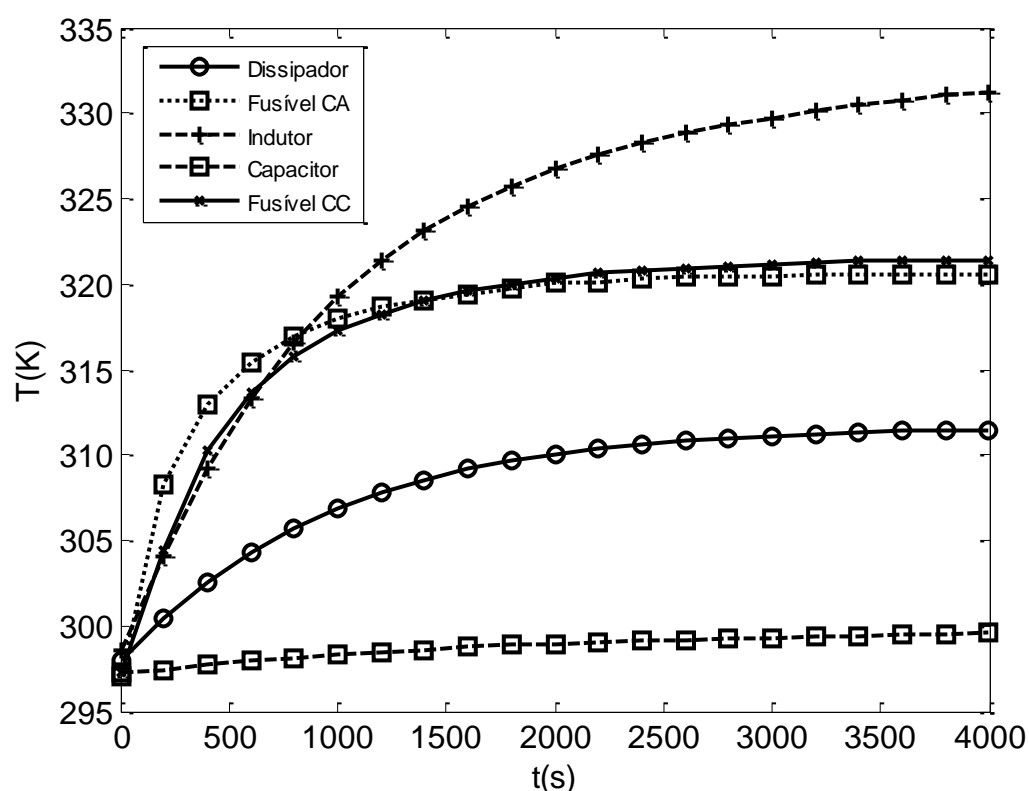


FIGURA 5.1 – TEMPERATURA DOS COMPONENTES

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

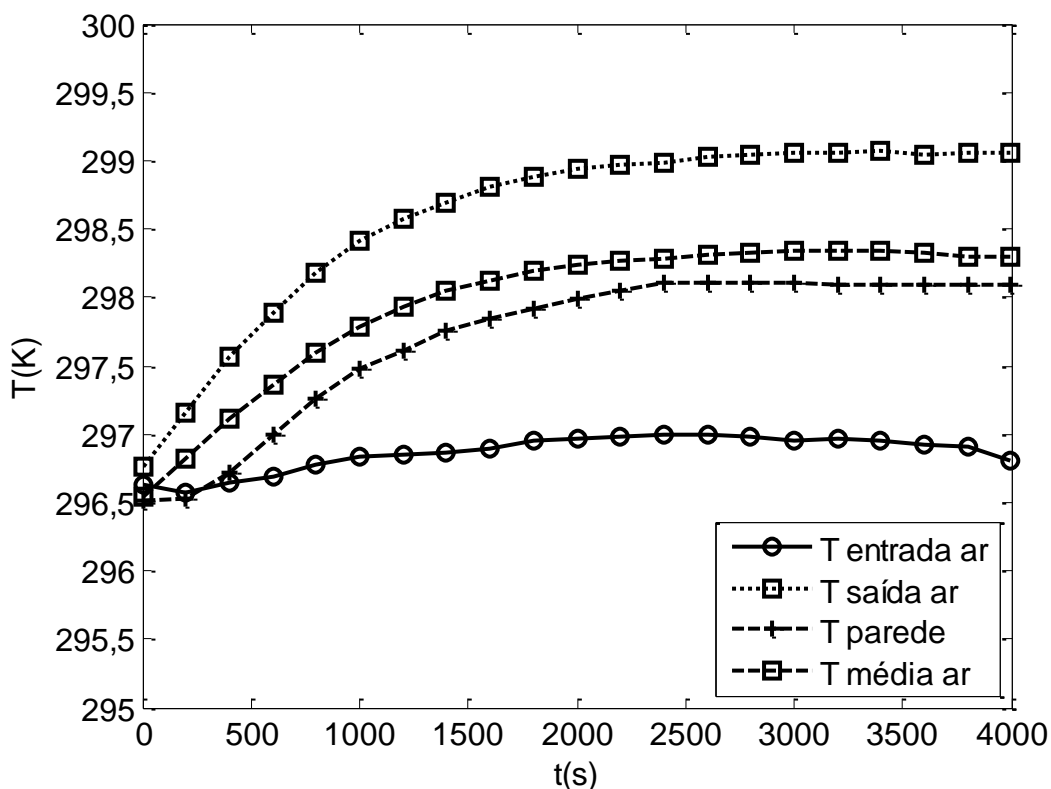


FIGURA 5.2 – TEMPERATURA DO AR  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

A FIGURA 5.1 mostra a evolução da temperatura média transiente medida para o dissipador, fusível CA, indutor, capacitores e fusível CC. O indutor é o componente que apresenta a maior inércia térmica dentro do PEBB tomando mais tempo para atingir as condições de regime estacionário. A evolução transiente durou aproximadamente 4000 s até atingir o regime estacionário.

De acordo com a TABELA 4.2, a temperatura do ar de dentro do gabinete foi medida com quatro termistores. Dois termistores mediram as temperaturas na entrada e na saída (ventilador) de ar. Então, a diferença de temperatura entre da entrada e a saída permite calcular a taxa de transferência de calor absorvida pela corrente de ar. Dois termistores mediram a temperatura do lado interno e externo da parede do gabinete. A FIGURA 5.2 mostra a evolução transiente da temperatura média do ar, e temperaturas de entrada e saída bem como temperaturas das paredes. Todas as temperaturas referentes ao ar se estabilizaram em aproximadamente 2000 s.

Adicionalmente o software VisIt (VISIT, 2008) foi usado para gerar uma visualização das temperaturas dos componentes e do ar interno. A malha usada foi a mesma usada nas simulações numéricas, como descrito anteriormente. A FIGURA 5.3 mostra a distribuição de temperatura interna medida resultante no plano médio do gabinete para condições de regime estacionário. Importante notar que a distribuição de geração de calor dos componentes é consistente com a distribuição verdadeira mostrada na FIGURA 5.3, e os componentes são revelados pelas regiões de temperaturas maiores, com exceção dos capacitores, os quais apresentam baixa geração de calor, portanto sua temperatura é quase a mesma temperatura do ar interno do gabinete.

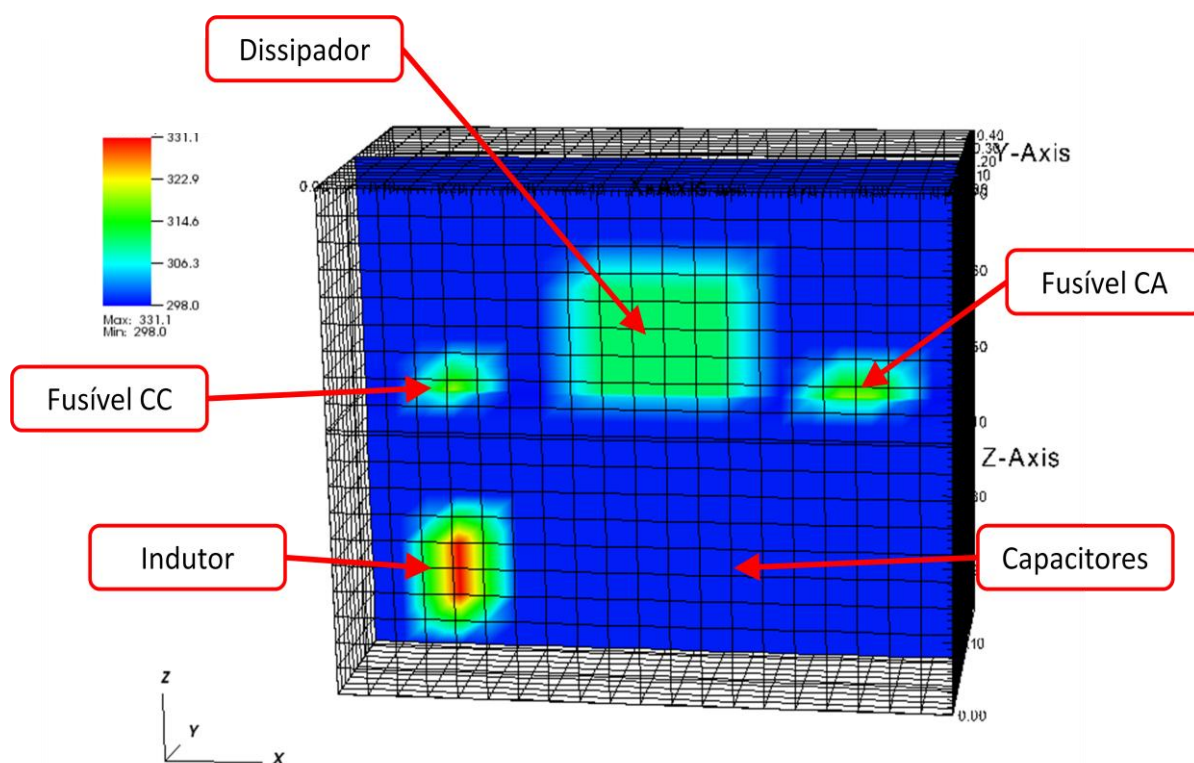


FIGURA 5.3 – RESPOSTA TÉRMICA DO EXPERIMENTO COM POTENCIA DE 11,12 KW  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

### 5.1.2 Ajuste do modelo PEBB

Um código computacional foi escrito em linguagem FORTRAN baseado no método numérico descrito anteriormente para obter solução do modelo matemático apresentado, isto é, as temperaturas do ar interno e dos componentes do PEBB. Os parâmetros de entrada são a geometria do PEBB, geração de calor dos componentes e propriedades físicas. A geometria e várias propriedades físicas foram medidas diretamente do protótipo do PEBB, e são listadas nas TABELAS 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4. A condição inicial do PEBB para as simulações foi ajustada em 293,3K. A malha convergida tinha 2000 elementos, ou seja, um número baixo o suficiente para ser classificada como esparsa. O tempo computacional necessário para se atingir o estado estacionário foi de 1500s.

A informação da composição de todos os equipamentos listada na TABELA 5.2 é usada para estimar densidades, calores específicos e condutividades térmicas equivalentes e, relação de superfície de transferência de calor, como segue:

$$\rho_{eq} = \frac{V_R}{V_m} \rho_R; c_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_i}{m_{co}}; k_{eq} = \left( \frac{V_R}{V_m} \right)^{1/3} k_R; \gamma = \frac{S_R}{S_m} \quad (5.1)$$

onde  $\rho_R$  é a média ponderada da densidade verdadeira;  $V_R/V_m$  é a relação entre o volume real do componente e o volume na malha;  $m_i$  é a massa do material  $i$  no componente, o qual é composto por  $n$  tipos de material;  $m_{co}$  é a massa do componente;  $k_R$  é média ponderada da condutividade térmica verdadeira, e  $\gamma = S_R/S_m$  é a relação entre superfície real de troca térmica do componente e a superfície de troca térmica na malha.

TABELA 5.1 – MALHA CONVERGIDA

MALHA	DIREÇÃO		
	$L_x$	$L_y$	$L_z$
Dimensão (m)	0,91	0,47	0,67
Número de EV	20	10	10

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

TABELA 5.2 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS EQUIPAMENTOS

COMPONENTE	QUANTIDADE	VOLUME (m <sup>3</sup> )	MASSA (kg)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	MATERIAL
Dissipador	1	0,00204	5,526	0,735	100% Al
Fusível CA	3	3,0e-5	0,108	0,0059	Liga Sn
Fusível CC	2	3,7e-5	0,108	0,0068	Liga Sn
Capacitor	6	0,00099	1,748	0,0615	60% Al, 10% PVC, 30% ar
Indutor	1	0,00512	14,00	0,1581	60% Cu, 40% Fe

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

TABELA 5.3 – DIMENSÕES E POSIÇÕES DOS EQUIPAMENTOS

EQUIPAMENTO	POSIÇÃO (m)			DIMENSÃO (m)		
	x	y	z	L <sub>x</sub>	L <sub>y</sub>	L <sub>z</sub>
Dissipador	0,3	0,2	0,35	0,3	0,2	0,2
Fusível CA	0,7	0,2	0,35	0,08	0,05	0,05
Fusível CC	0,1	0,2	0,35	0,08	0,05	0,05
Capacitor	0,3	0,2	0,05	0,4	0,3	0,2
Indutor	0,7	0,2	0,35	0,1	0,05	0,05

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

TABELA 5.4 – GERAÇÃO DE CALOR DOS COMPONENTES

COMPONENTE	TESTE 1 (200 V; 24 A; 4,8 kW)	TESTE 2 (279 V; 40 A; 11,12 kW)
	$\dot{Q}_{gen}$	$\dot{Q}_{gen}$
Dissipador	130	182
Fusível CA	8,7	11,5
Fusível CC	3	7,7
Capacitor	0	0
Indutor	23	60
Total=	164,7	261,2

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

O ajuste do modelo foi feito com o ajuste de potência do PEBB em 4,8 kW. O procedimento de ajuste do modelo consiste em resolver o problema inverso de estimativa de parâmetros (IPPE) (MINKOWYCZ *et al.*, 2006), usando o modelo matemático, isto é, tornando uma variável em um parâmetro, e vice-versa. Para isso, o que era originalmente uma variável é imposto ao modelo como um parâmetro de entrada. Neste estudo, as variáveis avaliadas no experimento foram as temperaturas medidas no protótipo do PEBB. Assim, até 24 parâmetros medidos (correspondendo às temperaturas internas medidas) podem se tornar variáveis no modelo, de acordo com a TABELA 4.2.

O procedimento começa por selecionar os parâmetros para se tornarem variáveis a serem determinadas. De acordo com a EQUAÇÃO 5.1, densidades equivalentes, calores específicos, e condutividades térmicas podem ser estimadas apropriadamente. Contudo, relações de superfícies de transferência de calor,  $\gamma$ , podem ser acessadas, mas a incerteza em medições diretas é alta. Portanto, as cinco relações de superfície de transferência de calor foram os parâmetros selecionados para serem ajustados por IPPE. A solução numérica do IPPE foi obtida em regime estacionário com ajuste de potência em 4,8 kW, e cinco temperaturas médias medidas em cada componente foram usadas como entrada no modelo matemático, o qual calculou cinco relações de superfície de transferência de calor, usando como estimativa inicial dos valores medidos. Como resultado, usando os  $\gamma$  calculados, as cinco temperaturas médias previstas pelo modelo matemático, se ajustaram aos valores medidos. Os resultados são mostrados na TABELA 5.5, o qual também mostra os valores da razão entre volumes verdadeiros e de malha requeridos pela EQUAÇÃO 5.1.

TABELA 5.5 – VALORES DE CORREÇÃO DE VOLUME E SUPERFÍCIE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

COMPONENTE	QUANTIDADE DE EV	$\frac{V_R}{V_m}$	$\gamma$ (IPPE)
Dissipador	90	0,755	1,940
Fusível CA	3	0,472	0,410
Fusível CC	2	0,566	0,437
Capacitor	96	1,417	0,882
Indutor	16	1,417	1,248

FONTE: DILAY *et al.* (2013)

### 5.1.3 Validação experimental do modelo PEBB

Após realizar o ajuste do modelo, o próximo passo foi a validação experimental do modelo, a qual foi feita com um ajuste de potência no PEBB de 11,12 kW. Os valores calculados de  $\gamma$  foram usados como entrada no modelo matemático com o objetivo de se obter numericamente a distribuição de temperatura



interna do PEBB. A condição inicial do PEBB para as simulações foi ajustada em 296,3 K.

A FIGURA 5.4 mostra a distribuição de temperatura simulada numericamente obtida com o modelo ajustado, a qual é bem comparada qualitativamente com a distribuição de temperatura obtida experimentalmente, na qual deve ser notado que temperaturas médias representam tanto os cinco componentes como o ar interno, portanto, uma comparação quantitativa dos resultados não é esperada, mas, a comparação é mostrada para se observar as tendências similares resultantes. Contudo, a temperatura máxima medida foi de 331,1 K enquanto que temperatura máxima calculada foi 331,2 K como pode ser observado nas legendas das FIGURAS 5.4 e 5.3, o que é de uma concordância muito boa. O tempo computacional via Newton-Raphson foi de 60s.

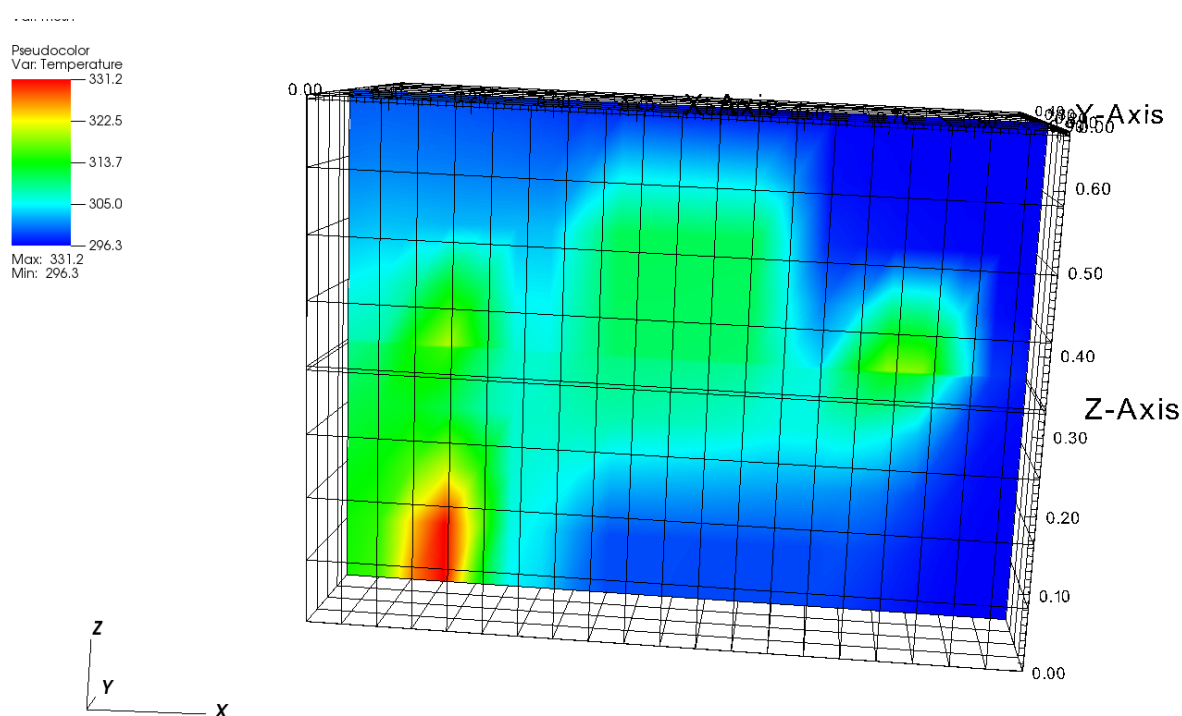


FIGURA 5.4 – RESPOSTA TÉRMICA DO MODELO COM POTENCIA DE 11,12 KW  
FONTE: DILAY *et al.* (2013)

Para se investigar mais profundamente a exatidão das previsões numéricas do modelo ajustado em comparação com os dados coletados pelo PEBB com ajuste de 11,12 kW, as FIGURAS 5.5-5.14 mostram resultados simulados e experimentais para as temperaturas médias dos cinco componentes e três locais com ar interno selecionados. Nos resultados experimentais as incertezas foram calculadas de

acordo com a EQUAÇÃO 4.1, e o maior valor observado de  $U_T/T$  durante a evolução de regime transiente para estacionário das medições foi usado pra calcular as barras de erro mostradas em todos os pontos experimentais.

Na FIGURA 5.5, é mostrado que a temperatura simulada do dissipador fica dentro das barras de erro para o regime estacionário e se desenvolve numa taxa maior no regime transiente, mas a maior parte permanece dentro da margem de erro. Isso ocorre provavelmente devido a uma pequena subestimação da inércia total (massa) do dissipador. Um fenômeno similar foi observado no indutor, como o resultado da FIGURA 5.6 mostra, mas neste caso, a inércia do indutor deve ter sido superestimada. Estes dois componentes são os que mais geram calor no PEBB, portanto é considerado que a as curvas simuladas e experimentais estão numa concordância qualitativa e quantitativa muito boa. Principalmente se a análise prioriza as condições de estado estacionário. As FIGURAS 5.7 e 5.8 permitem desenhar conclusões similares, neste caso com respeito à resposta térmica dos fusíveis CA e CC. Devido a significante menor geração de calor que os outros componentes e uma precisa estimativa da inércia, as curvas simuladas e experimentais dos capacitores concordam tanto em inclinação como em valores absolutos para todos os pontos, como mostra a FIGURA 5.9.

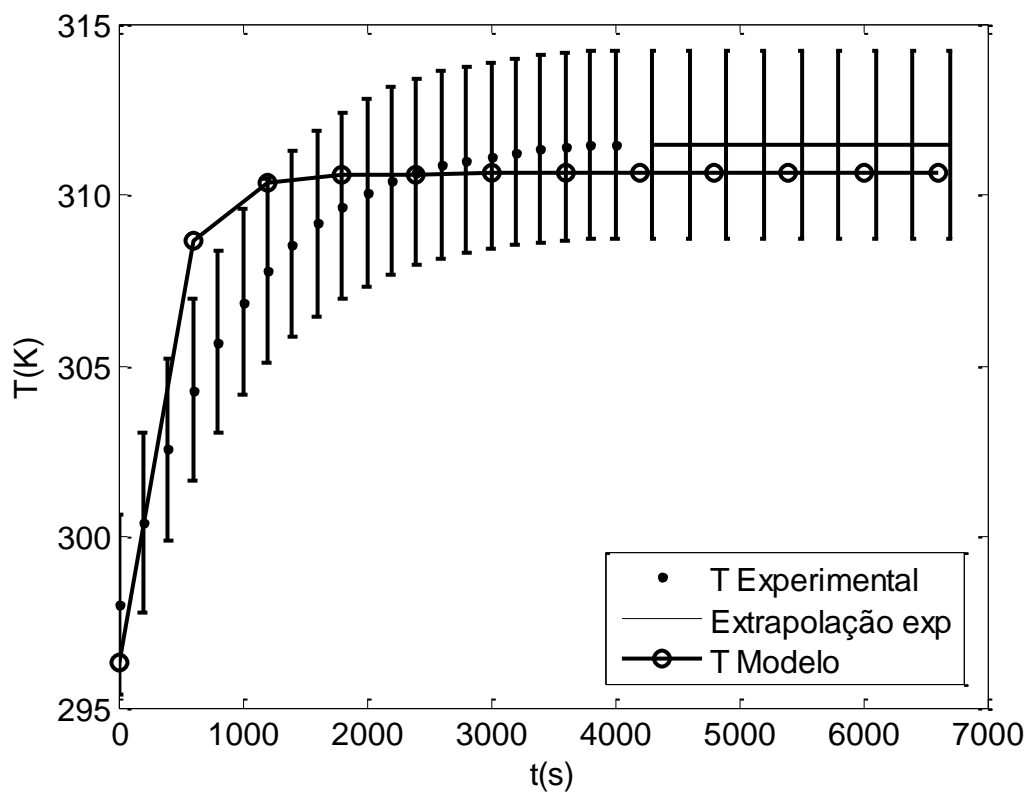


FIGURA 5.5 – TEMPERATURA DO DISSIPADOR  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

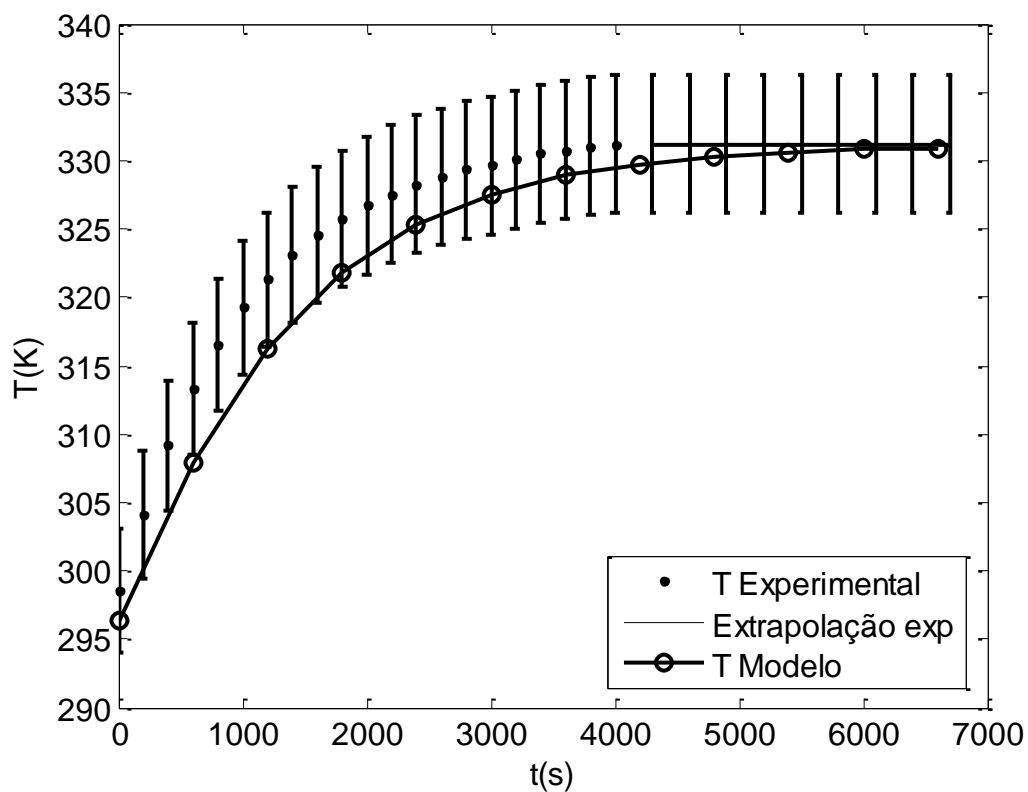


FIGURA 5.6 – TEMPERATURA DO INDUTOR  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

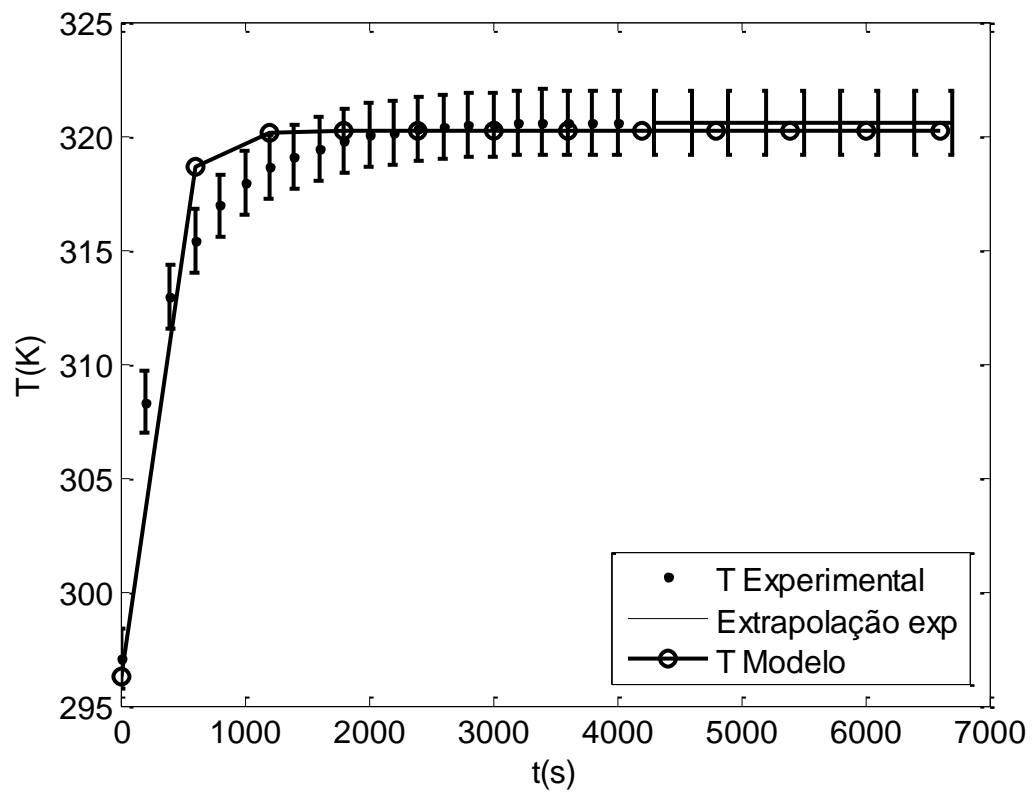


FIGURA 5.7 – TEMPERATURA DO FUSÍVEL CA  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

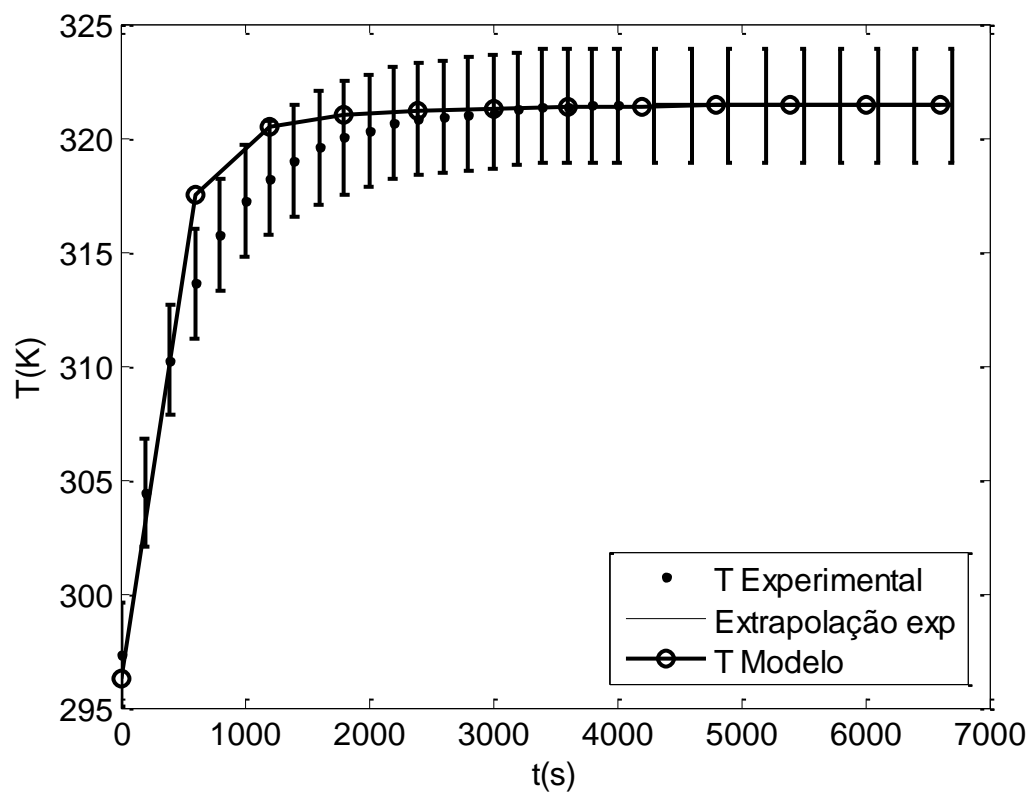


FIGURA 5.8 – TEMPERATURA DO FUSÍVEL CC  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

As temperaturas simuladas e experimentais para o ar interno em três diferentes localizações no PEBB são mostradas nas FIGURAS 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. Todos os valores de temperatura previstos ficam dentro das barras de erro durante a evolução do regime transiente até o regime permanente nas três localizações. Portanto, estes resultados testam e validam a hipótese assumida para escrever a EQUAÇÃO 3.22 que prediz a taxa extraída de transferência de calor pelo ar movido através do ventilador que flui através do PEBB, isto é, um campo de escoamento aproximado é capaz de permitir que um modelo matemático simplificado produza resultados precisos de previsões térmicas.

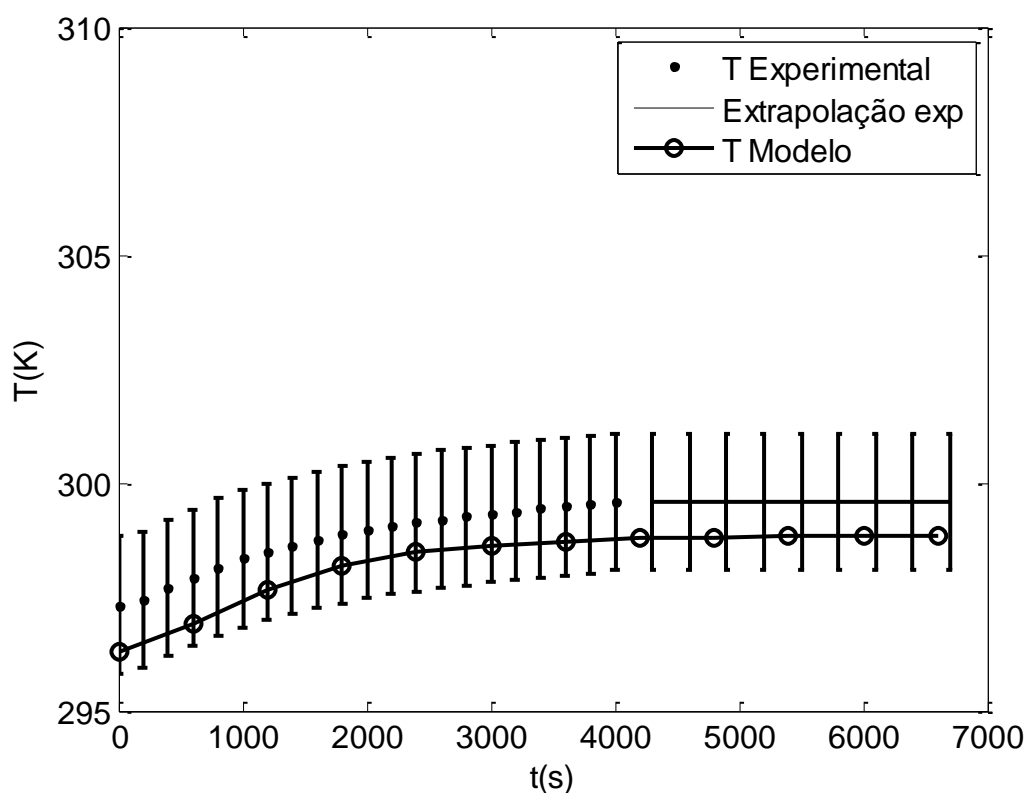


FIGURA 5.9 – TEMPERATURA DOS CAPACITORES  
FONTE: DILAY *et al.* (2013)

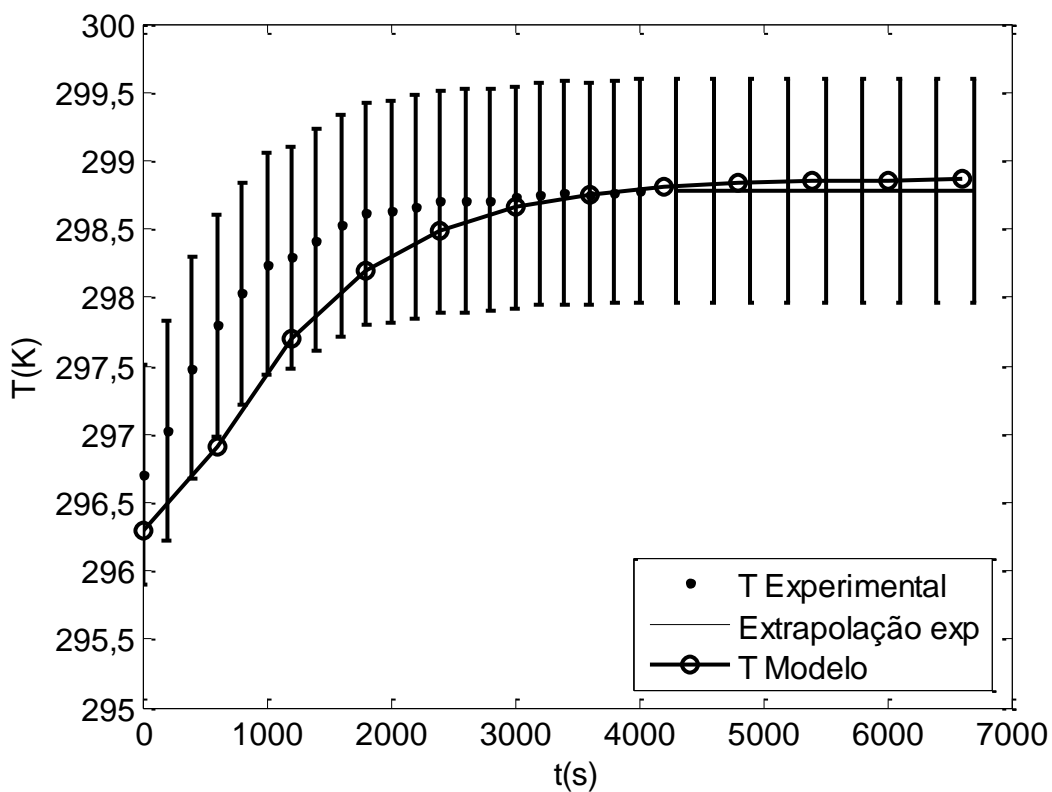


FIGURA 5.10 – TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T5 (53,24,18) cm  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

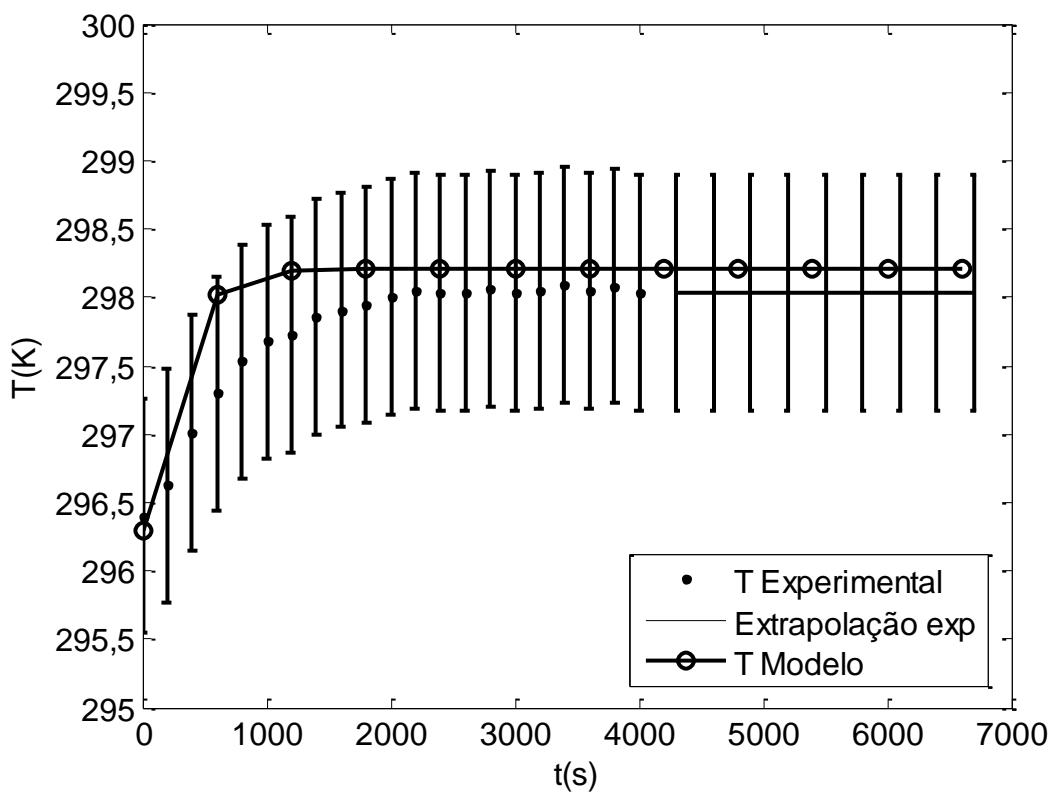


FIGURA 5.11 – TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T24 (79,24,22) cm  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

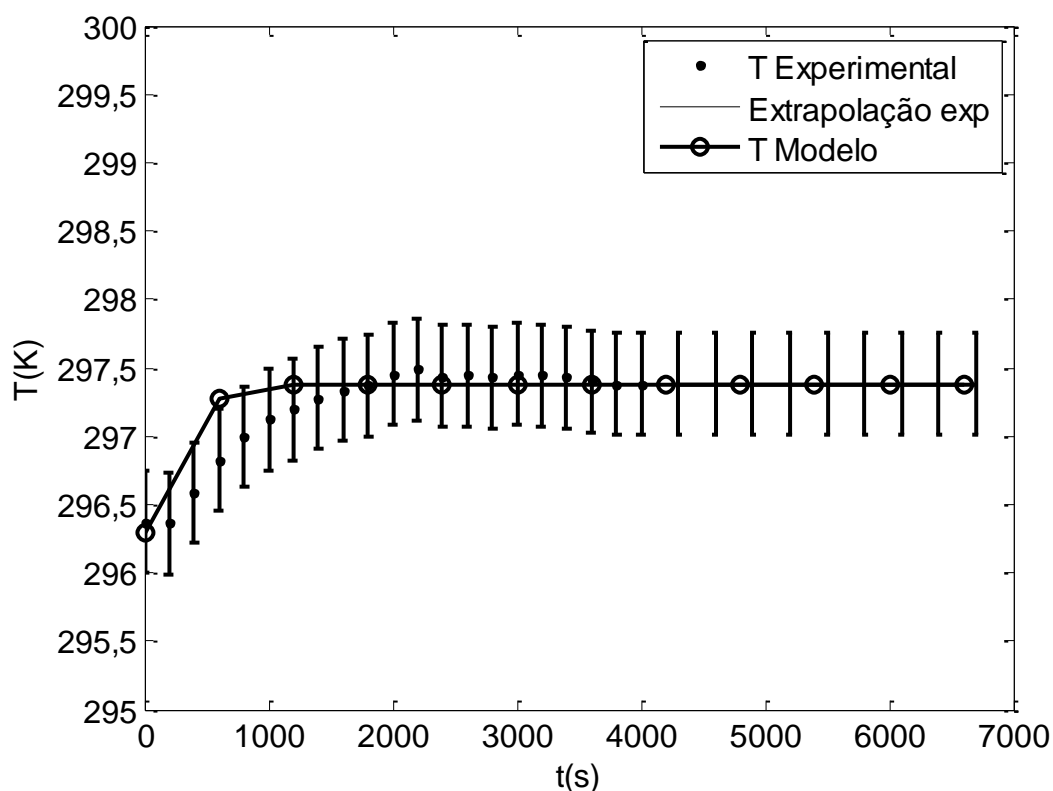


FIGURA 5.12 – TEMPERATURA DO AR POSIÇÃO T25 (78,28,50) cm  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

#### 5.1.4 Simulação do PEBB

Para ilustrar a aplicação do modelo do PEBB validado experimentalmente, a resposta térmica do PEBB é acessada através da condutância térmica, a qual é definida como segue:

$$UA = \left[ \dot{Q}_{\text{gen,tot}} - m_{\text{tot}} c_{\text{geral}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dT_i}{dt} \right] \frac{1}{T_{\text{air,avg}} - T_{\infty}} \quad (5.2)$$

As simulações numéricas foram conduzidas para  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}} = 164,7 \text{ W}$  e  $261,2 \text{ W}$ , começando com a condição inicial  $T_0 = 296,3 \text{ K}$  a qual foi ajustada mais alta do que a temperatura do ar externo de  $T_{\infty} = 296 \text{ K}$ . A razão é que nos experimentos, a

condição inicial do PEBB variou levemente nos três testes, isto é, entre 296 e 297 K. Portanto, na FIGURA 5.13, é visto que UA começa em  $t=0$  com um valor finito. Se o PEBB estivesse em perfeito equilíbrio térmico com o ambiente, então  $UA \rightarrow \infty$ , pois no denominador da EQUAÇÃO 5.2,  $\Delta T = T_0 - T_\infty = 0K$ . O termo  $m_{\text{tot}} c_{\text{geral}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{dT_i}{dt}$  representa a acumulação de energia na forma de calor dentro do gabinete durante o regime transiente. Este termo vai se reduzindo durante o processo de aquecimento até se anular quando é atingido o estado estacionário. As variáveis  $m_{\text{tot}}$  e  $c_{\text{geral}}$  representam a massa total e o calor específico do gabinete. Importante notar, que para o primeiro ajuste de potência do PEBB,  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}} = 164,7 W$ , UA é menor que no segundo, isto é,  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}} = 261,2 W$ . Portanto, o gabinete é capaz de rejeitar mais calor com  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}} = 261,2 W$  do que com  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}} = 164,7 W$ . Outra maneira de se observar a importância de se acessar UA para empacotamentos eletrônicos é notando que nos maiores UA, o equipamento eletrônico operará em menor temperatura, a qual deverá ser menor que um dado teto de temperatura de operação, o qual também determina o maior valor possível de  $\dot{Q}_{\text{gen,tot}}$  para o gabinete. Essa análise demonstra a importância de uma simulação transiente para acessar o desempenho do PEBB em controle, projeto e otimização, a qual vai depender do regime de operação esperado do PEBB, isto é, tanto se está sob uma carga transiente ou estacionária.



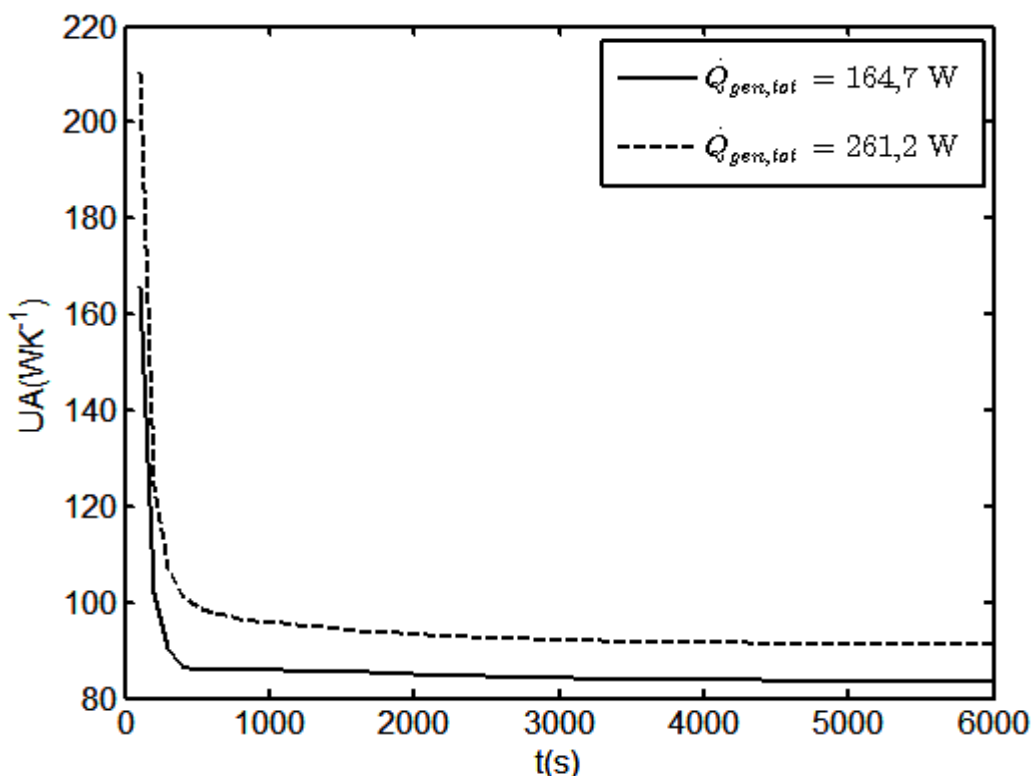


FIGURA 5.13 – CONDUTÂNCIA TÉRMICA  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

Finalmente, como um exemplo de aplicação do modelo em simulação transiente, uma análise transiente é conduzida numericamente com o modelo. A FIGURA 5.14 mostra a resposta térmica transiente do PEBB quando a geração total de calor muda de  $\dot{Q}_{gen,tot} = 164,7 \text{ W}$  para  $\dot{Q}_{gen,tot} = 261,2 \text{ W}$ , então volta para  $\dot{Q}_{gen,tot} = 164,7 \text{ W}$ , e finalmente sobre para  $\dot{Q}_{gen,tot} = 391,8 \text{ W}$ , a qual é uma carga 50% maior que  $\dot{Q}_{gen,tot} = 261.2 \text{ W}$ . O tempo total de simulação foi perto de 20.000 s. Além da informação do tempo requerido para atingir a nova condição de estado estacionário, os resultados demonstram que a temperatura dos componentes varia significativamente de um modo de aquecimento para outro, um efeito que se torna mais importante quando a geração total de calor aumenta é que a temperatura média do ar varia apenas levemente para todos os modos de aquecimento. Isso é explicado pelo fato que o ar tem uma condutividade térmica baixa e, portanto um contato térmico pobre com os componentes. Tal efeito é comumente descartado nos empacotamentos eletrônicos atuais os quais usualmente especificam condições de

operação baseadas na temperatura média do ar interno. Portanto, devido a baixa temperatura média do ar interno, o componente pode falhar quando a geração total de calor aumenta, como o presente modelo demonstra.

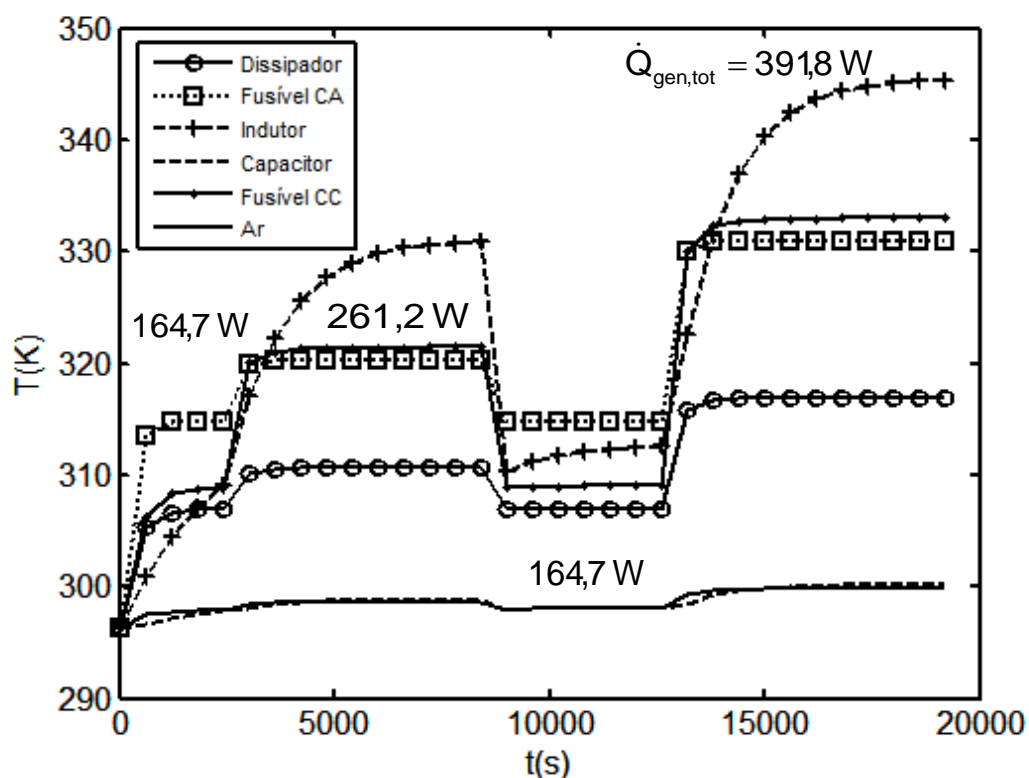


FIGURA 5.14 – RESPOSTA TÉRMICA TRANSIENTE  
 FONTE: DILAY *et al.* (2013)

## 5.2 NAVIO INTEIRAMENTE ELÉTRICO

No presente estudo, a geometria real de um *destroyer* DDG-51 dos Estados Unidos da América operando com arquitetura de corrente contínua em média voltagem (MVDC) é considerado. A malha necessária para se conduzir as simulações numéricas com o modelo proposto foi gerada com a técnica descrita anteriormente. A FIGURA 5.15 mostra um desenho em CAD de um *destroyer* tipo DDG-51 da marinha dos Estados Unidos da América.

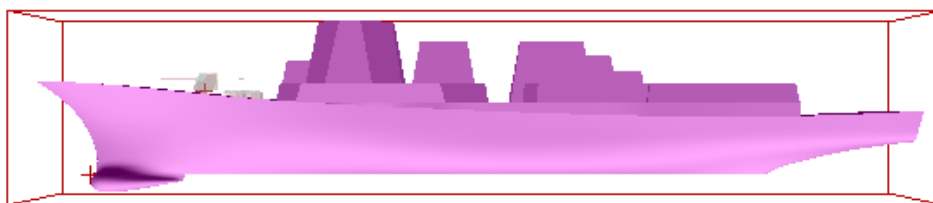


FIGURA 5.15 – IMAGEM CAD DE UM NAVIO DDG-51  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

### 5.2.1 Carga térmica e estratégias de resfriamento

Para acessar conceitualmente a distribuição de temperatura no interior do navio virtual com o uso do modelo proposto, a arquitetura inteiramente elétrica, baseada em corrente contínua de média tensão (MVDC), apresentada na FIGURA 5.16 foi utilizada. Em lugar de usar as cargas de um banco de dados (AMY, 2008), todas as cargas pequenas e médias foram agrupadas em suas respectivas zonas com uma estimativa de valor total. Além das cargas pequenas e médias, todas as grandes cargas do navio mostradas na FIGURA 5.16 foram levadas em consideração individualmente para as simulações.

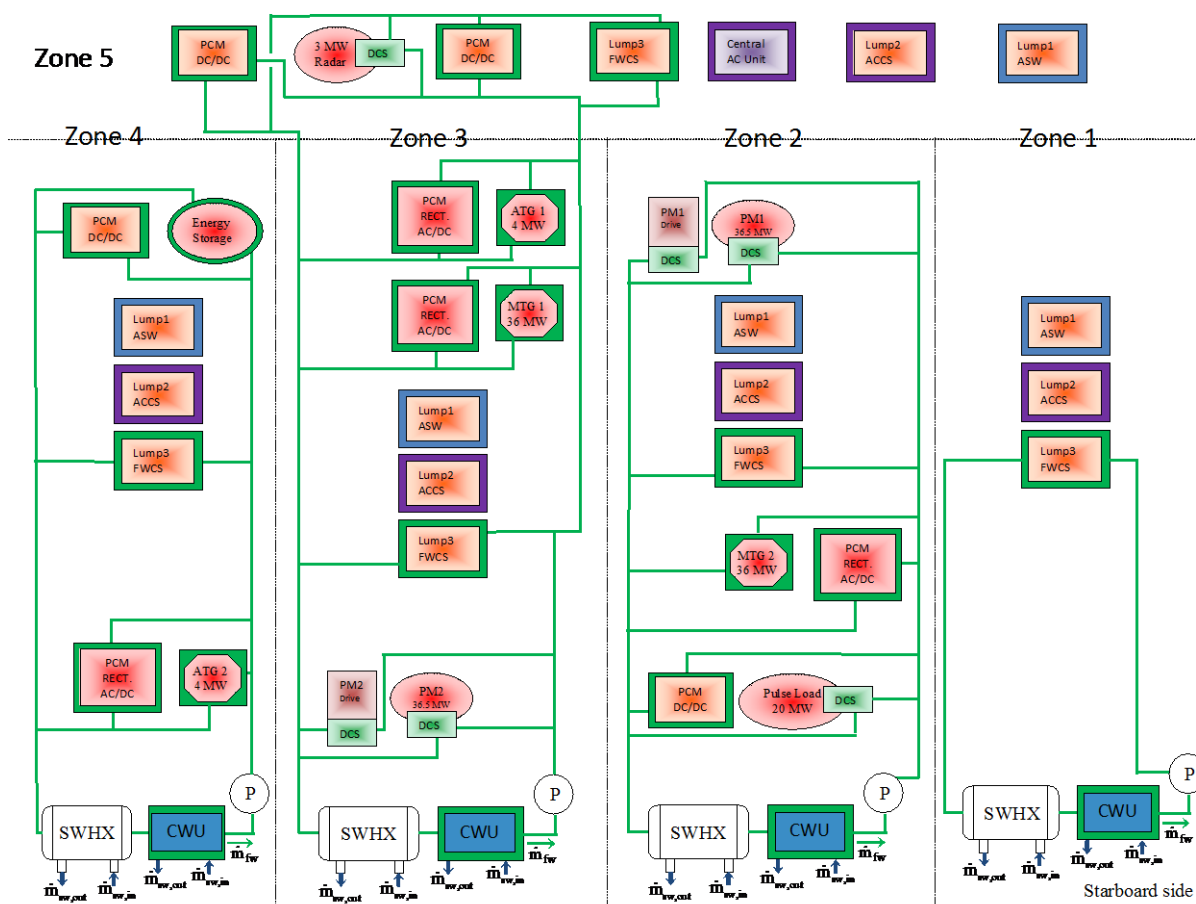


FIGURA 5.16 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS EQUIPAMENTOS NOCIONAIS E CIRCUÍTO DE RESFRIAMENTO, ONDE AC – AR CONDICIONADO; ACCS – SISTEMA RESFRIADO POR AR CONDICIONADO; DC/DC – CORRENTE CONTÍNUA PARA CONTÍNUA; AC/DC – CORRENTE ALTERNADA PARA CONTÍNUA; ASW – RESFRIADO POR ÁGUA DO MAR AUXILIAR; ATG – TURBINA A GÁS AUXILIAR; CWU – UNIDADE DE ÁGUA GELADA; DCS – SISTEMA DE RESFRIAMENTO DEDICADO; FWCS – SISTEMA DE RESFRIAMENTO POR ÁGUA FRESCA (DOCE);  $\dot{m}$  – TAXA DE FLUXO MÁSSICO; MTG – GERADOR A TURBINA A GÁS PRINCIPAL; P – BOMBA; PCM – MÓDULO DE CONVERSÃO DE POTÊNCIA; PM – MOTOR DE PROPULSAÇÃO; RECT – RETIFICADOR, E SWHX – TROCADOR DE CALOR COM ÁGUA DO MAR  
 FONTE: VARGAS *et al.* (2010).

O navio foi dividido em pequenos compartimentos (elementos de volume) e os equipamentos foram colocados em um ou mais elementos da grade de acordo com as dimensões verdadeiras. O procedimento foi projetado para começar com as coordenadas x, y e z de um equipamento em particular, listado nos dados nocionais (AMY, 2008), o qual é comparado com o ponto médio das coordenadas de todos os elementos da grade para se determinar em quais elementos o equipamento deve ser alocado.

A discretização usada segue o sistema de coordenadas padrão da Marinha dos Estados Unidos da América mostrado na FIGURA 5.17. O número de divisões

da malha resultante do procedimento de refinamento para ser obtida a malha convergida é descrito por Vargas *et al.* (2012). O número de decks e outras divisões mostradas na FIGURA 5.17 são apenas uma representação esquemática.

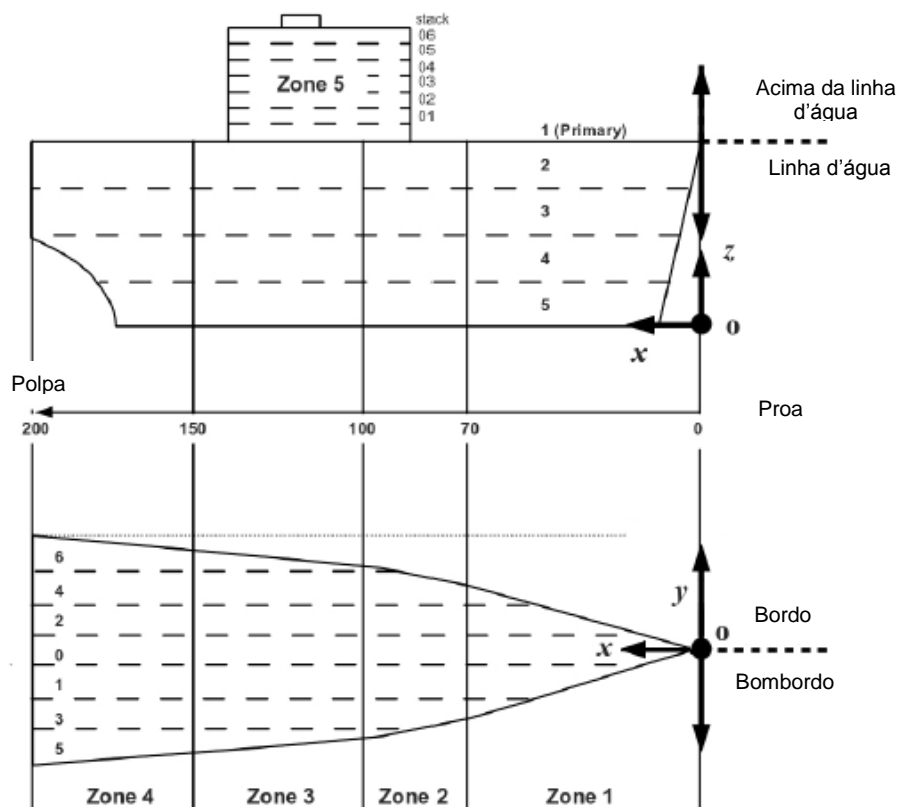


FIGURA 5.17 – DISTRIBUIÇÃO DAS ZONAS DO NAVIO E SISTEMA DE COORDENADAS DA MARINHA DOS EUA  
FONTE: VARGAS *et al.* (2011)

A distribuição espacial das peças de equipamento dentro do navio está listada na TABELA 5.6. Localizações de dimensões arbitrárias foram selecionadas para conduzir as simulações apresentadas neste trabalho. Contudo, as localizações e tamanhos dos equipamentos podem ser facilmente mudados nos dados de entrada de acordo com qualquer projeto mecânico de navio virtual.

TABELA 5.6 – POSIÇÕES E DIMENSÕES DOS EQUIPAMENTOS DO NAVIO INTEIRAMENTE ELÉTRICO

NO.	EQUIPAMENTO	ZONA	GERAÇÃO CALOR (kW)	POSIÇÃO			TAMANHO		
				x (m)	y (m)	z (m)	L <sub>x</sub> (m)	L <sub>y</sub> (m)	L <sub>z</sub> (m)
1	SWHX_ZONA-1	1	0.0	27.0	1.7	0.2	5.0	2.0	2.0
2	CWU_ZONA-1	1	-100.0	27.0	-2.3	0.2	5.0	2.0	2.0
3	Lump2_ZONA-1	1	10.0	20.0	1.7	9.0	5.0	2.0	2.0
4	Lump3_ZONA-1	1	418.5	27.0	1.7	6.0	5.0	2.0	2.0
5	Lump1_ZONA-1	1	36.3	20.0	1.7	6.0	5.0	2.0	2.0
6	SWHX_ZONA-2	2	0.0	50.0	0.0	0.2	5.0	3.0	2.0
7	CWU_ZONA-2	2	-500.0	50.0	-6.0	0.2	5.0	2.0	2.0
8	STBD_M_DCS_ZONA-2	2	730.0	50.0	6.0	9.0	5.0	3.0	2.0
9	STBD_M_ZONA-2	2	0.0	50.0	0.0	9.0	5.0	3.0	2.0
10	Lump2_ZONA-2	2	0.0	50.0	-6.0	12.0	5.0	3.0	2.0
11	Lump3_ZONA-2	2	486.0	50.0	0.0	4.0	5.0	3.0	2.0
12	Lump1_ZONA-2	2	100.0	50.0	-6.0	4.0	5.0	3.0	2.0
13	MTG2_ZONA-2	2	720.0	50.0	-6.0	9.0	5.0	2.0	2.0
14	PCM_AC-DC_ZONA-2	2	705.0	50.0	6.0	4.0	5.0	2.0	2.0
15	PLDCS_ZONA-2	2	36.7	60.0	0.0	12.0	5.0	3.0	2.0
16	Pulse_Load_ZONA-2	2	0.0	50.0	0.0	12.0	5.0	3.0	2.0
17	STBD_MD_DCS_ZONA-2	2	744.0	50.0	3.0	0.2	5.0	3.0	2.0
18	STBD_MD_ZONA-2	2	0.0	60.0	0.0	0.2	5.0	3.0	2.0
19	SWHX_ZONA-3-5	3	0.0	70.5	1.8	0.2	5.0	3.0	2.0
20	CWU_ZONA-3-5	3	-500.0	70.5	-4.2	0.2	5.0	2.0	2.0
21	MTG1_ZONA-3	3	720.0	100.5	-4.2	0.2	5.0	2.0	2.0
22	PCM_AC-DC-1_ZONA-3	3	705.6	93.5	7.8	9.0	5.0	3.0	2.0
23	ATG1_ZONA-3	3	0.2	93.5	1.8	9.0	5.0	3.0	2.0
24	PCM_AC-DC-2_ZONA-3	3	153.6	93.5	4.8	0.2	5.0	2.0	2.0
25	Port-Motor-Drive_ZONA-3	3	744.0	93.5	-4.2	9.0	5.0	3.0	2.0
26	Port_Motor_ZONA-3	3	730.0	93.5	-4.2	4.0	5.0	3.0	2.0
27	Lump2_ZONA-3	3	0.0	102.0	1.8	14.0	5.0	3.0	2.0
28	Lump3_ZONA-3	3	583.5	93.5	1.8	4.0	5.0	3.0	2.0
29	Lump1_ZONA-3	3	200.0	102.0	1.8	0.2	5.0	3.0	2.0
30	SWHX_ZONA-4	4	0.0	110.0	1.8	0.2	5.0	3.0	2.0
31	CWU_ZONA-4	4	-100.0	110.0	-4.2	0.2	5.0	2.0	2.0
32	PCM_AC-DC_ZONA-4	4	153.6	110.0	7.8	5.2	5.0	2.0	2.0
33	ATG2_ZONA-4	4	160.0	130.0	1.8	4.0	5.0	2.0	2.0
34	ESPCM_DC-DC_ZONA-4	4	120.0	130.0	5.8	6.0	5.0	2.0	2.0
35	Lump3_ZONA-4	4	444.8	110.0	-4.2	11.0	5.0	3.0	2.0
36	Lump2_ZONA-4	4	0.0	120.0	7.8	8.0	5.0	3.0	2.0
37	Lump1_ZONA-4	4	50.0	120.0	-4.2	8.0	5.0	3.0	2.0
38	Radar_PCM-DC-DC-1_ZONA-5	5	60.0	65.0	1.8	14.0	3.0	2.0	2.0
39	Radar_ZONA-5	5	562.5	65.0	-2.0	17.0	3.0	2.0	2.0
40	Radar_PCM-DC-DC-2_ZONA-5	5	60.0	65.0	2.0	17.0	3.0	2.0	2.0
41	Lump3_ZONA-5	5	30.0	65.0	1.0	19.0	3.0	2.0	2.0
42	Lump2_ZONA-5	5	0.0	75.0	1.0	19.0	3.0	2.0	2.0
43	Lump1_ZONA-5	5	30.0	68.0	0.0	14.0	3.0	2.0	2.0

FONTE: VARGAS *et al*, 2011

### 5.2.2 Geração de malha

A geometria tridimensional resultante é mostrada na FIGURA 5.18. A malha convergida (solução não mais depende da malha) tem um total de 7725 elementos. O que pode ser considerada como malha esparsa. As dimensões geométricas do navio virtual inteiramente elétrico são mostradas na TABELA 5.7, juntamente com as informações da malha convergida. A malha convergida usada para se obter os resultados de simulação neste trabalho possui 10 divisões do tipo deck (5 acima e 5 abaixo da linha da água), 50 divisões de proa a popa e 15 divisões de bordo a estibordo.

TABELA 5.7 – DIMENSÕES DO NAVIO VIRTUAL E TAMANHO DA MALHA

DIREÇÃO	COMPRIMENTO (m)	DIVISÕES
Proa a popa	153,5	50
Bombordo a estibordo	20,6	15
Quilha até linha da água	14,62	5
Linha da água até topo da superestrutura	14,62	5

FONTE: VARGAS *et al.* (2011)

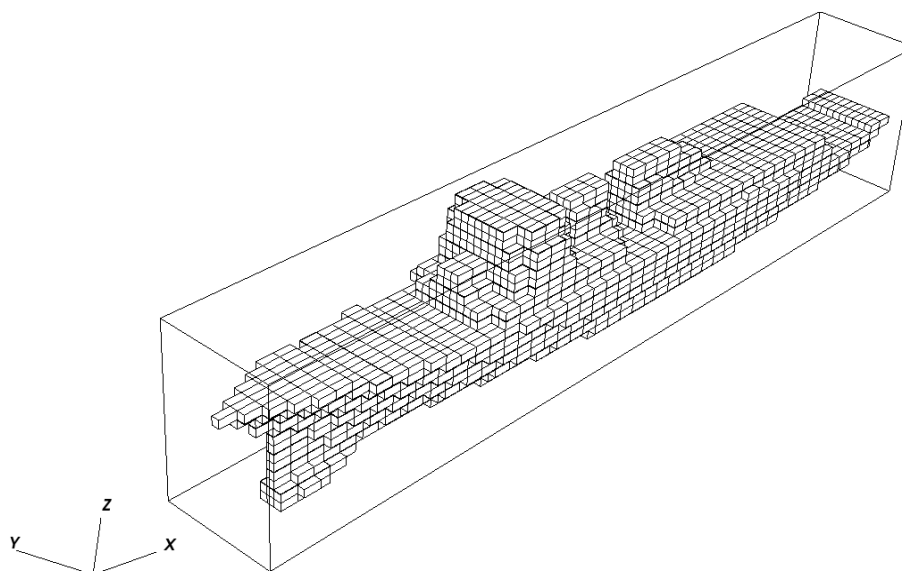


FIGURA 5.18 – MALHA CONVERGIDA DO NAVIO VIRTUAL COM FORMA EXTERNA DO DESTROYER DDG-51

FONTE: DILAY *et al.* (2012)

### 5.2.3 Condições de simulação

As condições externas consideradas nas duas simulações feitas neste trabalho são: vento frontal com velocidade de 10 m/s e temperatura do ar em 260K e 305K, e, água do mar com temperatura de 280K e 288K, irradiação solar local média de  $400 \text{ W m}^{-2}$  (paredes do topo, leste e norte) e  $0 \text{ W m}^{-2}$  (paredes oeste e sul). A lista de equipamentos do navio virtual e as taxas de geração de calor são mostradas na TABELA 4.4, onde também são mostradas as posições e respectivos tamanhos dos equipamentos usados nas simulações.

Em ambos os cenários analisados neste trabalho, foi assumido que o casco do navio estava 10m dentro da água, temperatura inicial de 288K e também foi assumido que a umidade relativa inicial era  $\phi_{i0}=0,8$  (80 %).

Em relação ao projeto térmico, trocadores de calor com água do mar (SWHX) com coeficientes globais de transferência de calor conhecidos,  $U$  [ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ], e áreas,  $A$  [ $\text{m}^2$ ], foram alocados nas zonas 1, 2, 3-5 e 4, tal como  $(U, A) = (100, 100)$ ;  $(100, 500)$ ;  $(100, 1000)$ , e  $(100, 100)$ , respectivamente. Unidades de água gelada (CWU) também foram alocadas nas zonas 1, 2, 3-5 e 4, com capacidades de refrigeração conhecidas de 100, 500, 500 e 100kW, respectivamente. Finalmente, vazões iguais de água doce e do mar de 8, 60, 60, e  $10 \text{ kg s}^{-1}$  foram selecionadas para as zonas 1, 2, 3-5 e 4, respectivamente.

Além das simulações de regime estacionário, foram realizadas simulações em regime transiente, isto é, dinâmicas neste estudo. As simulações dinâmicas foram realizadas em três condições diferentes: i) variação da potência total instalada dentro do navio, ii) variação da vazão de água fresca e iii) variação da capacidade frigorífica dos chillers

As simulações consistiram em iniciar o teste com o parâmetro em estudo a 50% do valor nominal durante 10.000s, passar para 100% durante 10.000s, voltar a 50% durante 10.000s e finalmente passar o parâmetro para 150% do valor nominal



durante o período suficiente para atingir o estado estacionário. Foi variado um parâmetro a cada teste somente e gerado para cada parâmetro um conjunto de resultados que representa a curva de variação de temperatura de cada equipamento do navio ao longo do tempo.

Foram selecionadas as condições com temperatura do ar e da água do mar de 305K e 288K respectivamente. Estas são as temperaturas maiores e que representam a situação de maior desafio ao gerenciamento térmico do navio, portanto, foram escolhidas para as simulações dinâmicas.

Nos casos de estudos em regime estacionário o tempo computacional foi entre 5 e 10 minutos para atingir a convergência, i.e., a norma euclidiana dos resíduos atingir menos de  $10^{-3}$ . Portanto, um baixo tempo computacional foi obtido em todos os casos. Nas simulações de regime transiente o tempo computacional atinge 50 minutos. O computador utilizado nas simulações possuía um processador Intel Pentium Dual-Core T2330 com 4 GB RAM rodando sistema operacional Linux Fedora 19 de 64 bits. Todos os códigos foram escritos em FORTRAN 90.

#### 5.2.4 Campo de temperatura e umidade relativa

O campo de temperatura resultante para o dia de 260K é mostrado na FIGURA 5.19. A temperatura máxima observada foi de 348K, como mostrado na legenda da FIGURA 5.19 o que demonstra a efetividade das estratégias de resfriamento com água doce e água do mar em extrair as grandes taxas de geração de calor mostradas na TABELA 5.6 para fora do navio, e mantendo a água de resfriamento abaixo do ponto de evaporação. As restrições neste modelo foram colocadas para manter a água gelada abaixo do ponto de evaporação, essas restrições podem ser mudadas de acordo com os requerimentos especificados num sistema verdadeiro.

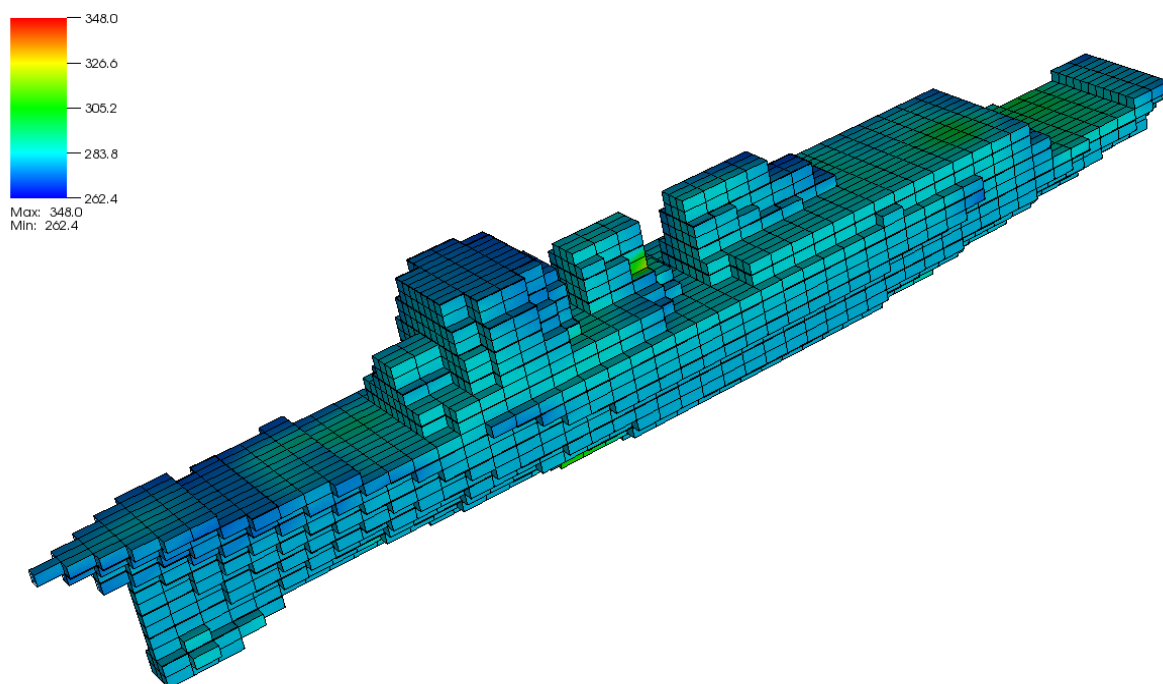


FIGURA 5.19 – CAMPO DE TEMPERATURA EXTERNO (DIA DE 260K)  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

Os resultados são, adicionalmente, analisados internamente no plano médio do navio mostrado na FIGURA 5.20. Como esperado, as temperaturas mais altas ocorrem nas zonas 2 e 3 onde as taxas de geração de calor são maiores.

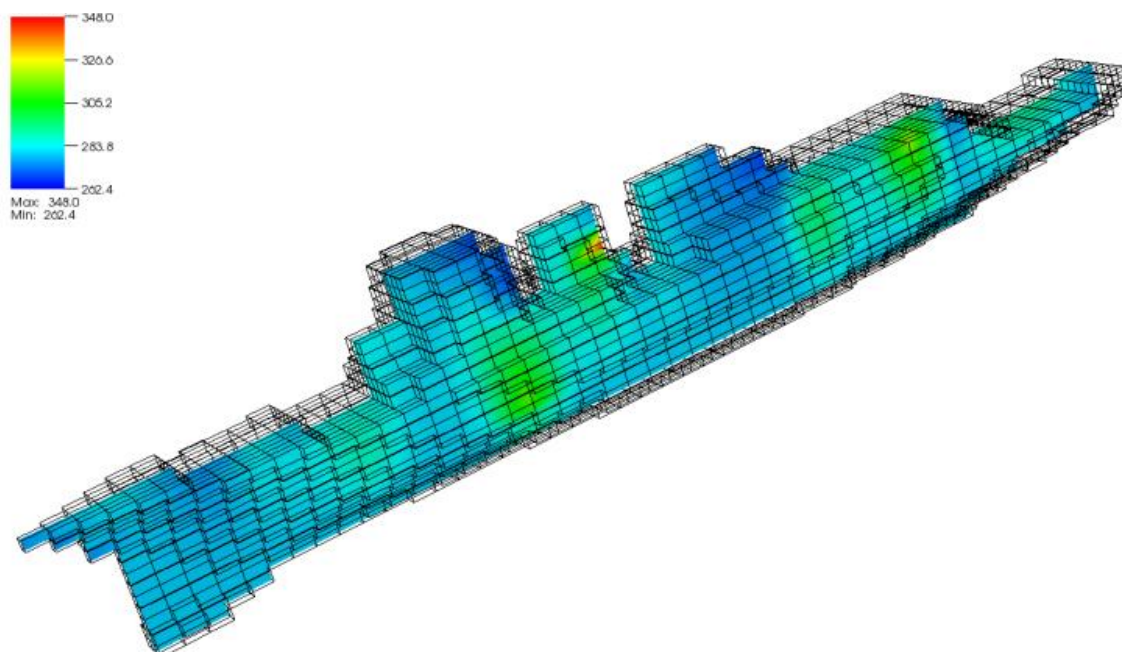


FIGURA 5.20 - CAMPO DE TEMPERATURA NO PLANO MÉDIO DO NAVIO (DIA DE 260K)  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

O campo de temperatura externo resultante para a segunda simulação num dia de 305K é mostrado na FIGURA 5.21. A máxima temperatura dentro do navio foi 356,2K o que demonstra a efetividade das estratégias de resfriamento em extrair calor para fora do navio, mesmo em um dia mais quente que o previamente simulado. Para redução ainda maior de temperatura, a capacidade de resfriamento por ar condicionado deve ser aumentada. Nesta simulação, é possível notar a linha da água no casco através da distribuição de temperatura na superfície.

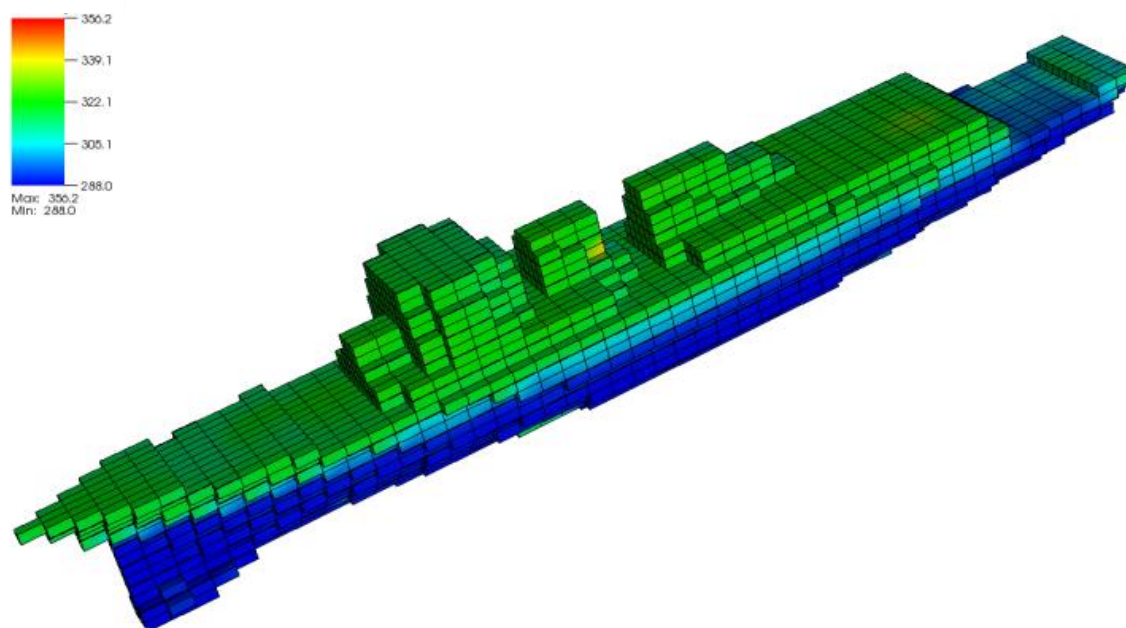


FIGURA 5.21 – CAMPO DE TEMPERATURA EXTERNO (DIA DE 305K)  
 FONTE: DILAY *et al.* (2012)

A seguir, os resultados são analisados internamente no plano médio do navio na FIGURA 5.22. Novamente, as temperaturas mais altas se encontram nas zonas 2 e 3 onde as taxas de geração de calor são maiores. A FIGURA 5.23 ilustra o campo de umidade relativa resultante no plano médio do navio. Interessante notar que com o incremento da temperatura a umidade relativa diminui nos elementos de volume com ar, como esperado termodinamicamente. É importante conhecer o campo de umidade relativa para evitar condensação em equipamentos eletrônicos. Ou seja, devem ser evitadas umidades relativas altas (próximas a 100%). Também, nos elementos de volume sólidos, o modelo coloca  $\phi_i = 0$ , portanto, é possível identificar onde os equipamentos sólidos estão localizados com base na distribuição de umidade relativa resultante.

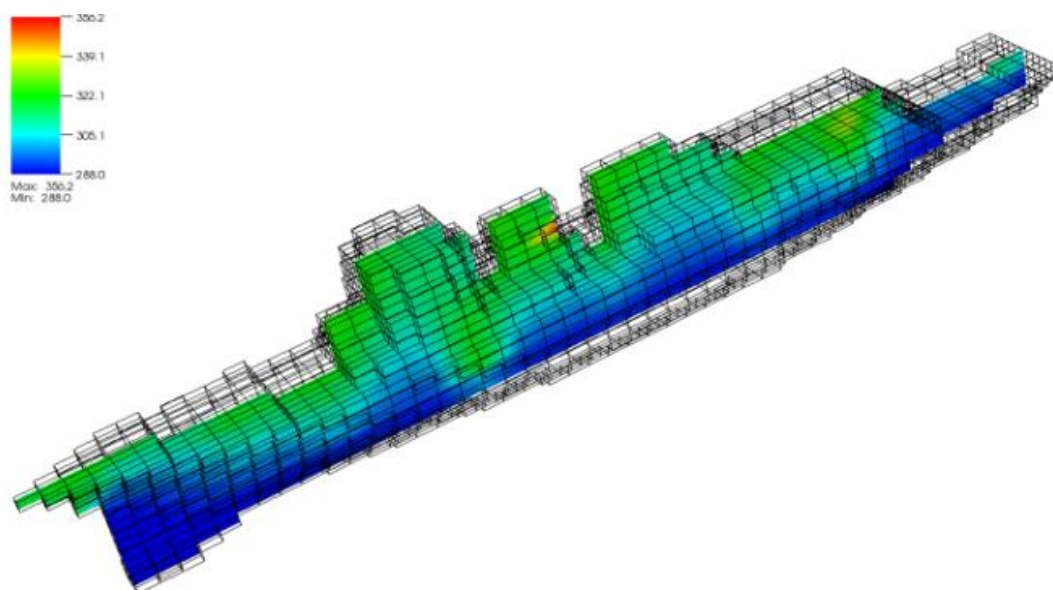


FIGURA 5.22 – TEMPERATURA NO PLANO MÉDIO DO NAVIO (DIA DE 305K)  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

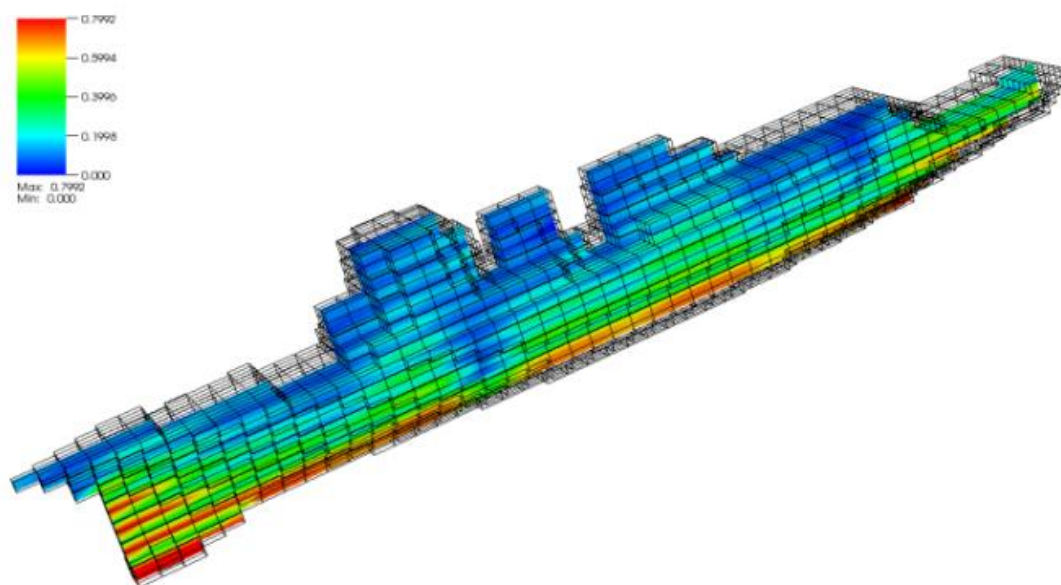


FIGURA 5.23 – CAMPO DE UMIDADE RELATIVA (DIA DE 305K)  
FONTE: DILAY *et al.* (2012)

### 5.2.5 Simulação dinâmica da variação da potência total

O comportamento térmico transiente do navio foi avaliado. São apresentados aqui as curvas de variação de temperatura ao longo do tempo de 4 equipamentos apenas. São eles o STBD-M-DCS zona 2, Radar zona 5, drive do motor de bordo zona 3 e motor de bordo zona 3. Estes equipamentos apresentaram as maiores variações de temperatura na simulação, por esse motivo e para fins de síntese e priorização, apenas eles são apresentados. Contudo, as curvas de temperatura para os demais 39 equipamentos estão disponíveis. O tempo computacional foi de 3000 s.

As FIGURAS 5.24 e 5.25 mostram as variações de temperatura ao longo do tempo em função da mudança da potência total de 50%, 100%, 50% e 150%. Observa-se primeiramente que o tempo de estabilização da temperatura é em torno de 20 horas, i.e.,  $8 \times 10^4$  segundos. Isso se deve à grande massa e consequente inércia térmica do navio. Lembrando que os equipamentos interagem termicamente uns com os outros. Este é um dos diferenciais desta metodologia. Em outras simulações deste porte, as interações entre equipamentos via o ambiente interno não são levadas em conta.

A FIGURA 5.24 mostra a temperatura inicial do STDB-M-DCS zona 2 em 288K subindo até 304K. Neste ponto a potência foi aumentada em todo o navio de 50% para 100% do valor nominal da TABELA 5.6 como se observa pela descontinuidade da derivada da curva. O aquecimento levou a temperatura até 320K nos próximos 10.000s quando a potencia voltou a 50% e a temperatura caiu até 312K. Finalmente a potência foi levada a 150% e a simulação parou quando o regime estacionário foi atingido 40.000s depois e temperatura estacionou em 375 K.

A comparação da curva da FIGURA 5.25 com a FIGURA 5.24 mostra que além das temperaturas nos picos serem maiores, a inclinação da curva é maior o que caracteriza uma menor inércia térmica.

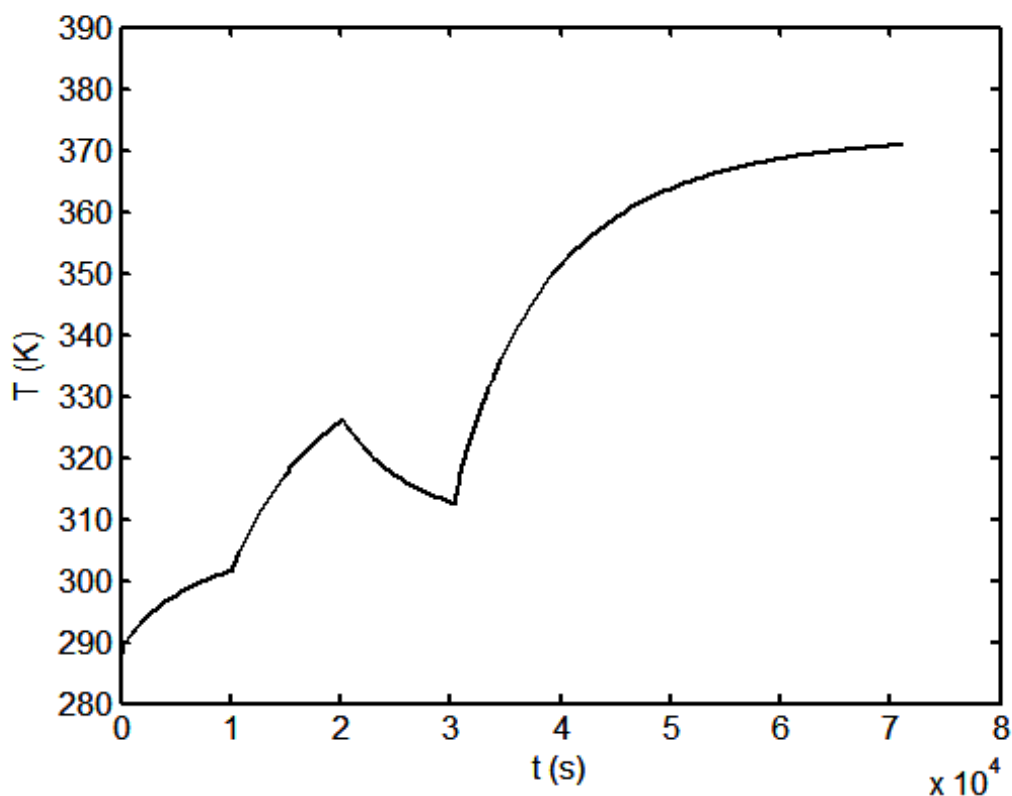


FIGURA 5.24 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO STBD M DCS ZONA-2  
 FONTE: O AUTOR (2013)

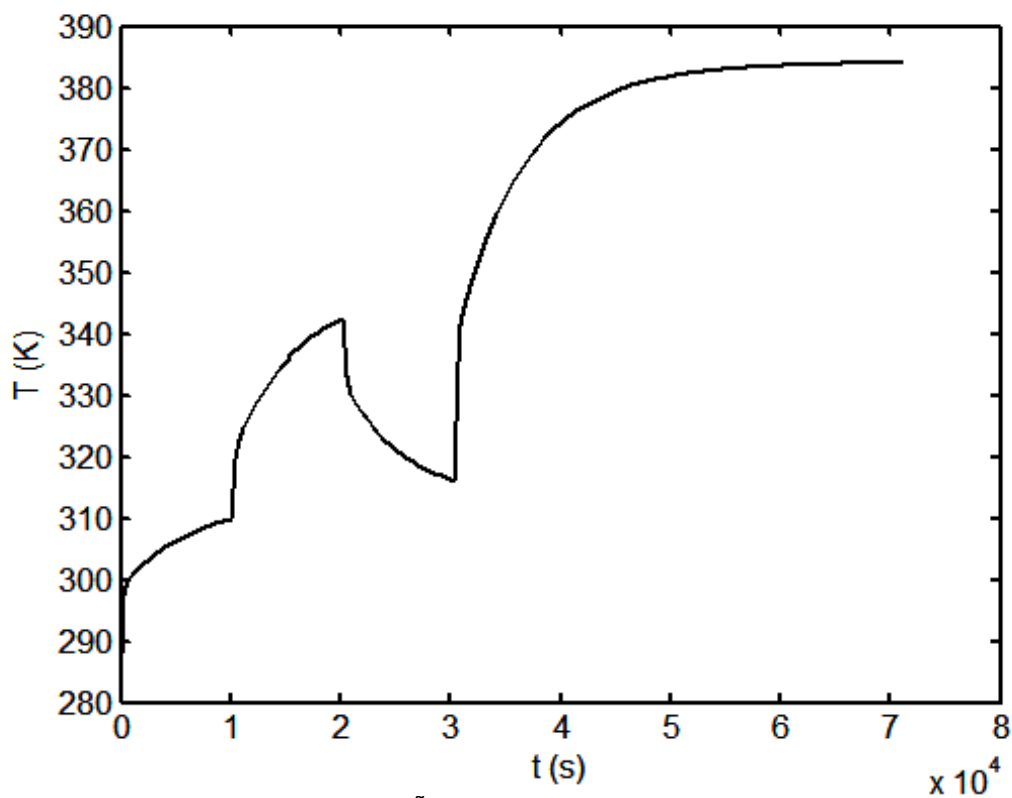


FIGURA 5.25 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO RADAR ZONA 5  
 FONTE: O AUTOR (2013)

A análise similar à da FIGURA 5.24 e 5.25 é feita às FIGURA 5.26 e 5.27 onde é mostrada a variação de temperatura do drive do motor de bordo na zona 3 e, FIGURA 5.27, motor de bordo da zona 3. A variação da potência dissipada de 50%, 100%, 50% e 100% resultam nas curvas de temperatura com os picos na potência em 100% e depois na potência a 150% quando se atinge o regime estacionário na faixa de 370K. O tempo computacional foi de 3000 segundos.

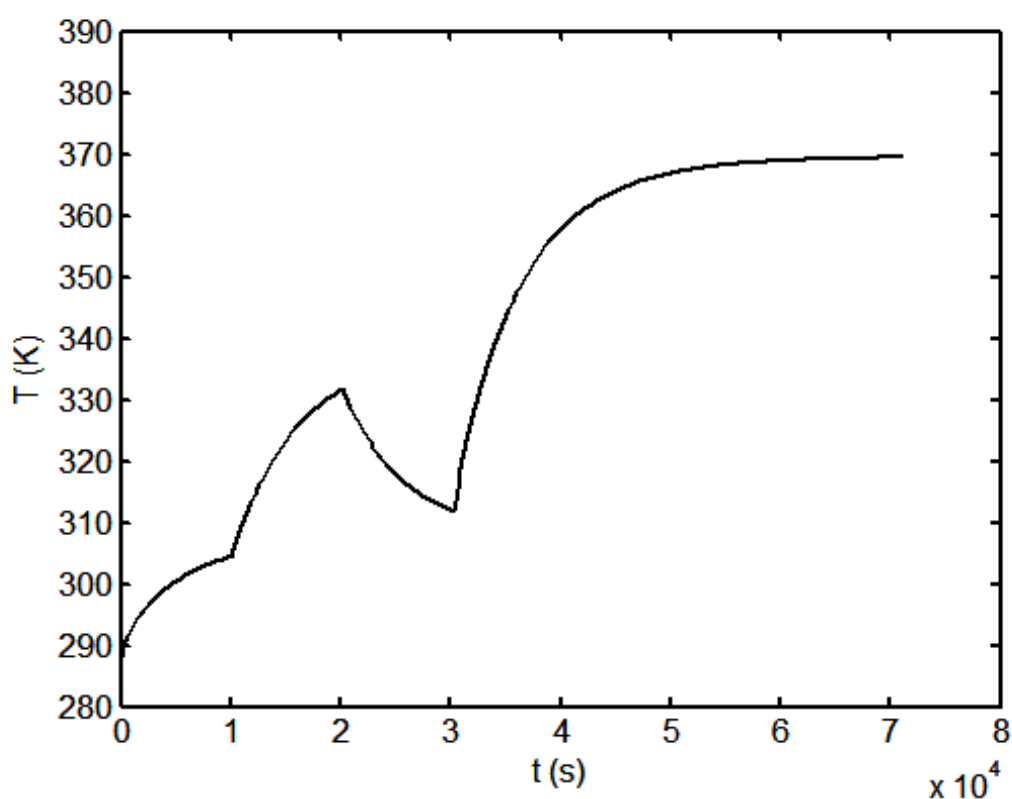


FIGURA 5.26 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR DE BORDO ZONA 3  
FONTE: O AUTOR (2013)



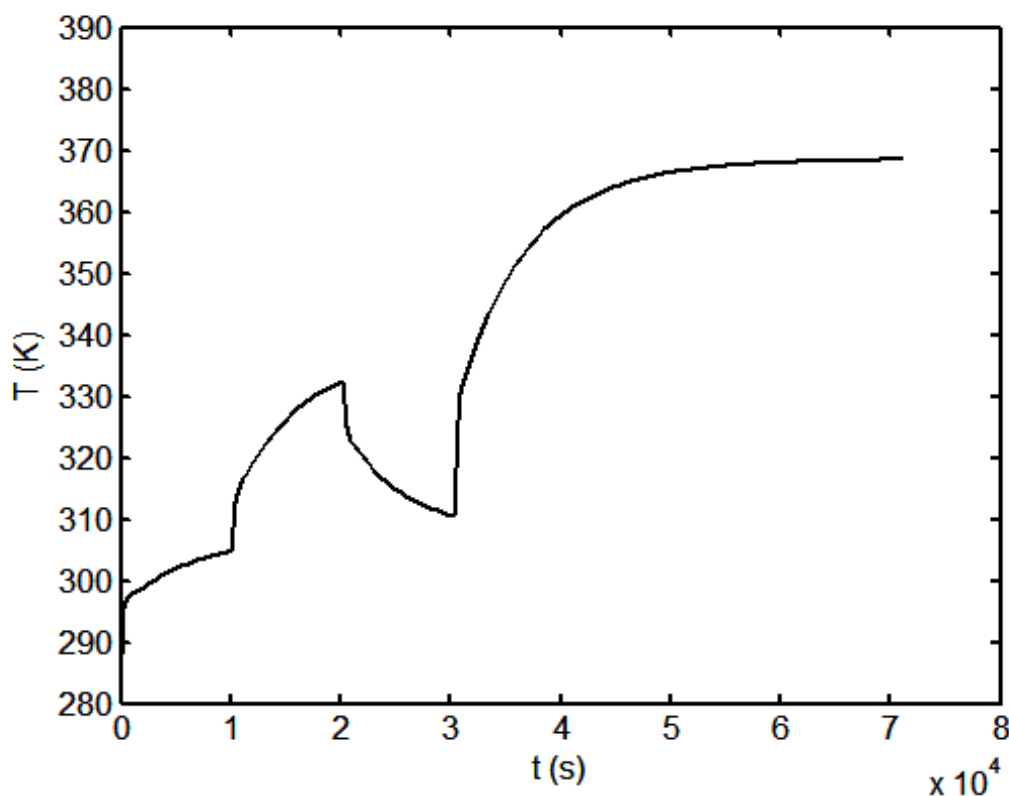


FIGURA 5.27 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR DE BORDO ZONA 3  
 FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.2.6 Simulação dinâmica da variação de vazão de água de resfriamento

A variação de vazão de água fresca de resfriamento de 50%, 100%, 50% e 150% da vazão nominal em intervalos de 10.000s, produziu as curvas das FIGURAS 5.28 e 5.29. A FIGURA 5.28 mostra que no início da simulação a temperatura do STBD-M-DCS zona 2 estava em 288K. Nos primeiros 10.000s de simulação, com vazão de água fresca de resfriamento a 50% da nominal, a temperatura atingiu 340K. O aumento da vazão para 100% não foi suficiente para baixar a temperatura. Assim, ao final dos 20.000s de simulação a temperatura praticamente não se alterou. Novamente a vazão voltou a 50% e a temperatura subiu até 365K. Com o aumento da vazão naquele momento a 150% a temperatura baixou até 320K.

A FIGURA 5.29 mostra que o comportamento do radar é o mais sensível no navio com respeito à vazão de água de resfriamento. Este equipamento atinge um pico de 395K na segunda vez que a vazão de água é reduzida a 50%. Por ter uma baixa inércia térmica, quando a vazão vai a 150% a temperatura rapidamente é reduzida para 335K.

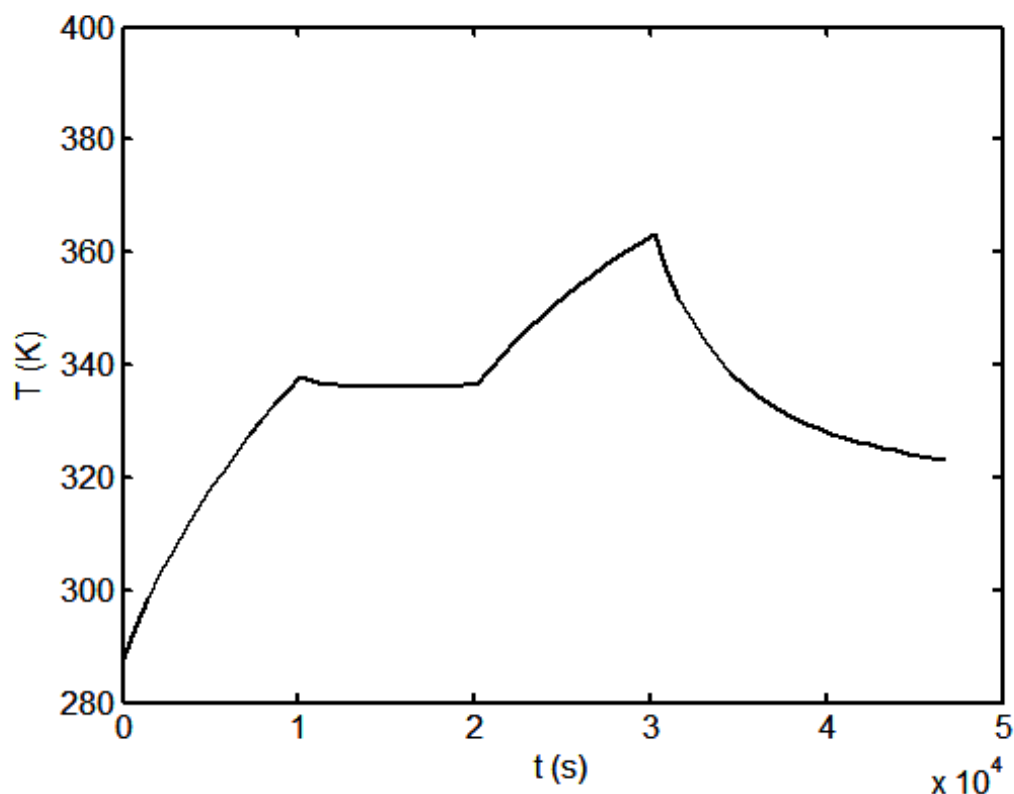


FIGURA 5.28 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO STBD M DCS ZONA-2  
FONTE: O AUTOR (2013)

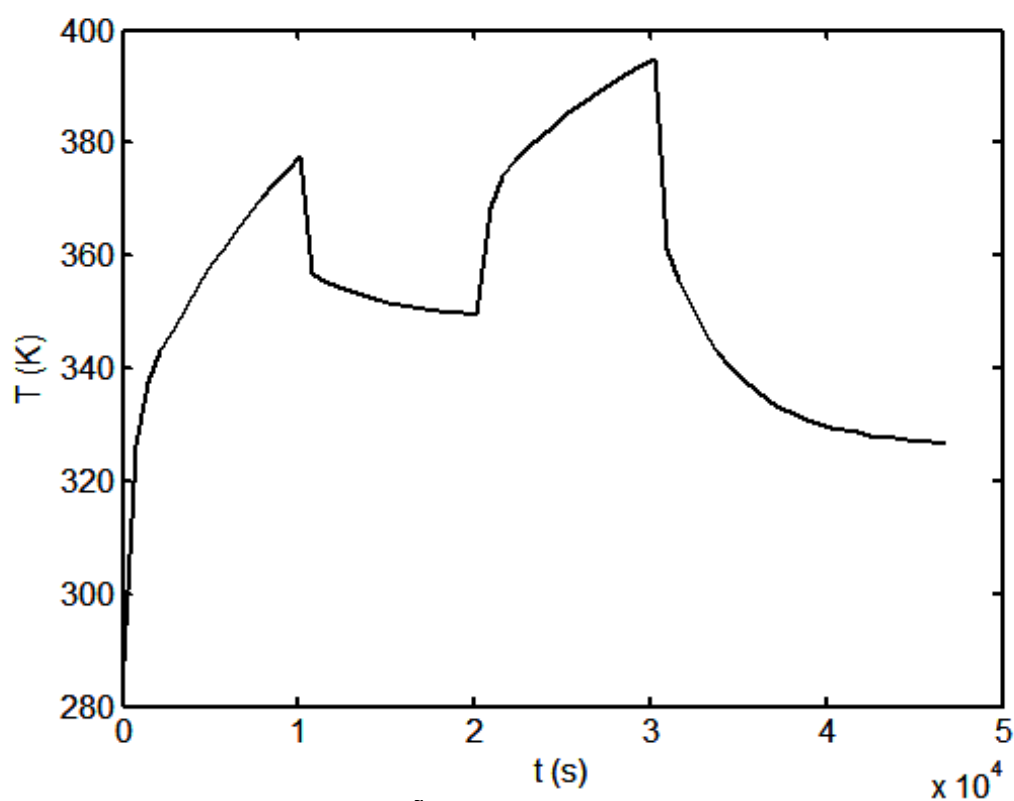


FIGURA 5.29 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO RADAR ZONA 5  
 FONTE: O AUTOR (2013)

O motor de bordo da zona 3 e o seu drive apresentam o comportamento mostrada nas FIGURAS 5.30 e 5.31. O pico de temperatura para ambos os equipamentos está na casa de 375K quando a vazão de água de resfriamento é reduzida a 50% pela segunda vez. Quando a vazão de água sobre a 150% a temperatura diminui até atingir o regime estacionário na temperatura de 320K num tempo de mais 40.000s. Nesta fase observa-se que o motor tem redução de temperatura mais abrupta que o drive.

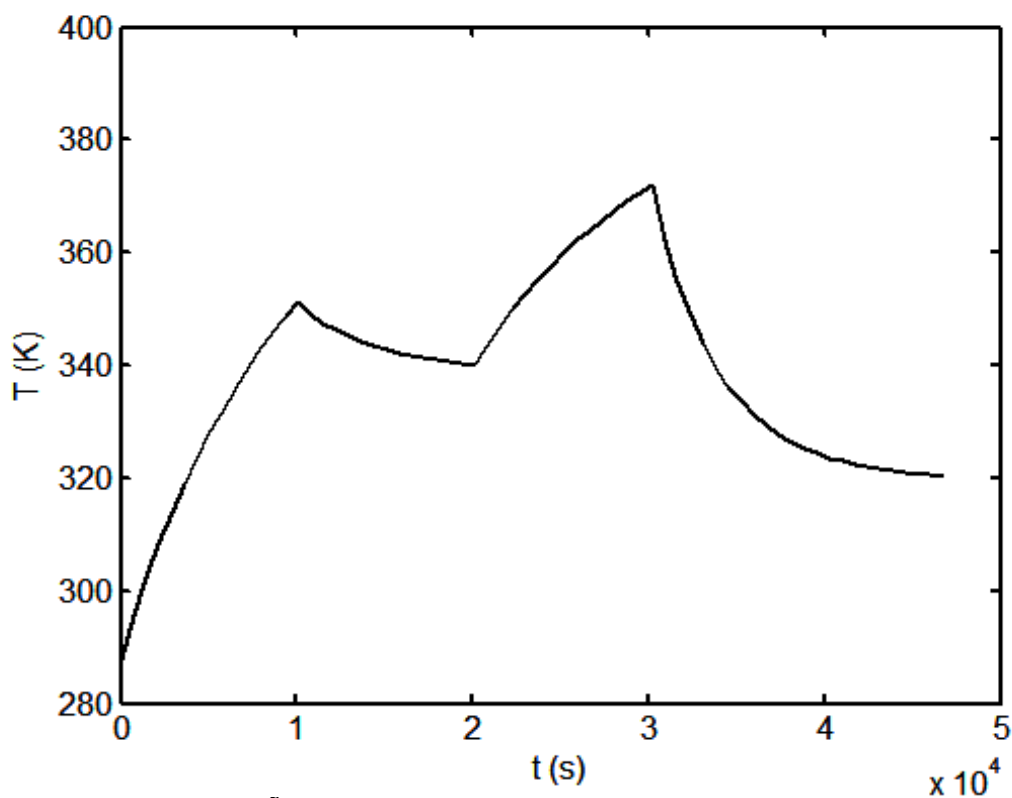


FIGURA 5.30 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR DE BORDO ZONA 3  
 FONTE: O AUTOR (2013)

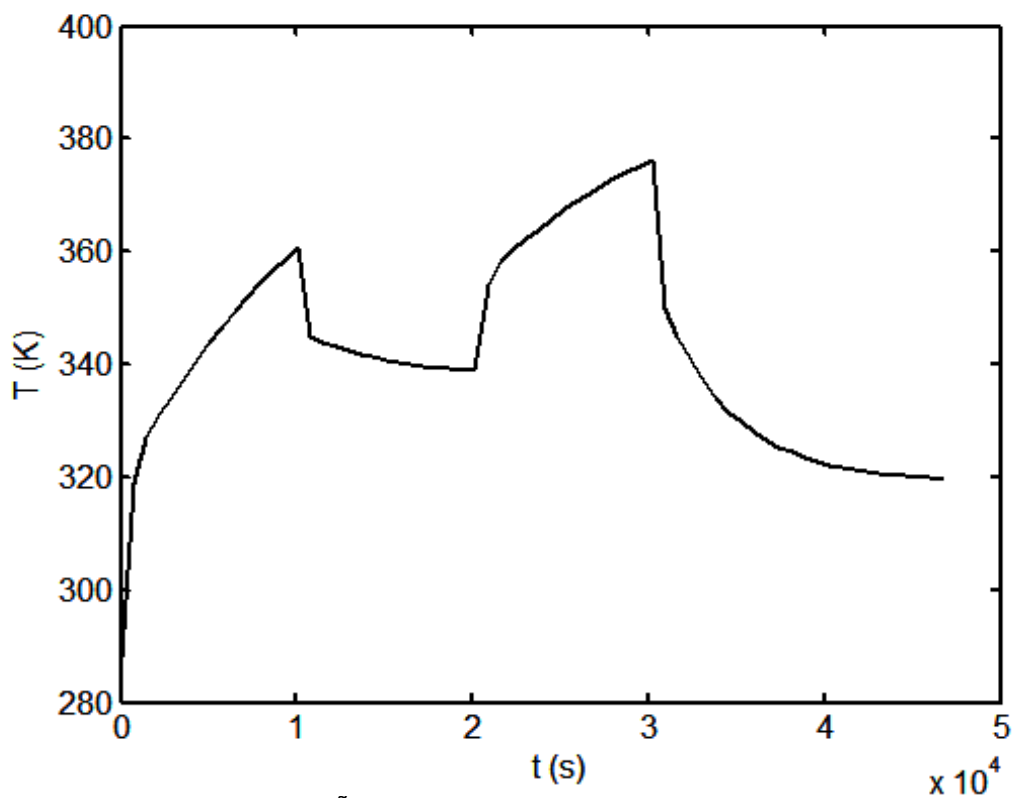


FIGURA 5.31 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR DE BORDO ZONA 3  
 FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.2.7 Simulação dinâmica da variação de capacidade dos *chillers*

Na terceira simulação dinâmica as capacidades frigoríficas dos *chillers* do navio são reduzidas a 50%, elevadas a 100%, reduzidas novamente a 50% e depois levadas a 150%. As variações de temperatura das FIGURAS 5.32 e 5.33 e FIGURAS 5.34 e 5.35 mostram que os equipamentos em análise não apresentam grande sensibilidade térmica às variações de capacidade dos *chillers*. Isto pode ser observado na FIGURA 5.33 quando a capacidade do *chiller* é levada a 150% a temperatura do radar da zona 5 baixa de 350K para 345K. Ou seja, diferença de apenas 5K. O circuito de refrigeração possui um trocador de calor resfriado por água do mar instalado antes do *chiller*. Assim, mesmo com a capacidade dos *chillers* reduzida, nesta configuração, observa-se que o trocador de calor com água do mar é uma redundância importante em um navio de combate sujeito a ter um *chiller* comprometido durante um ataque.

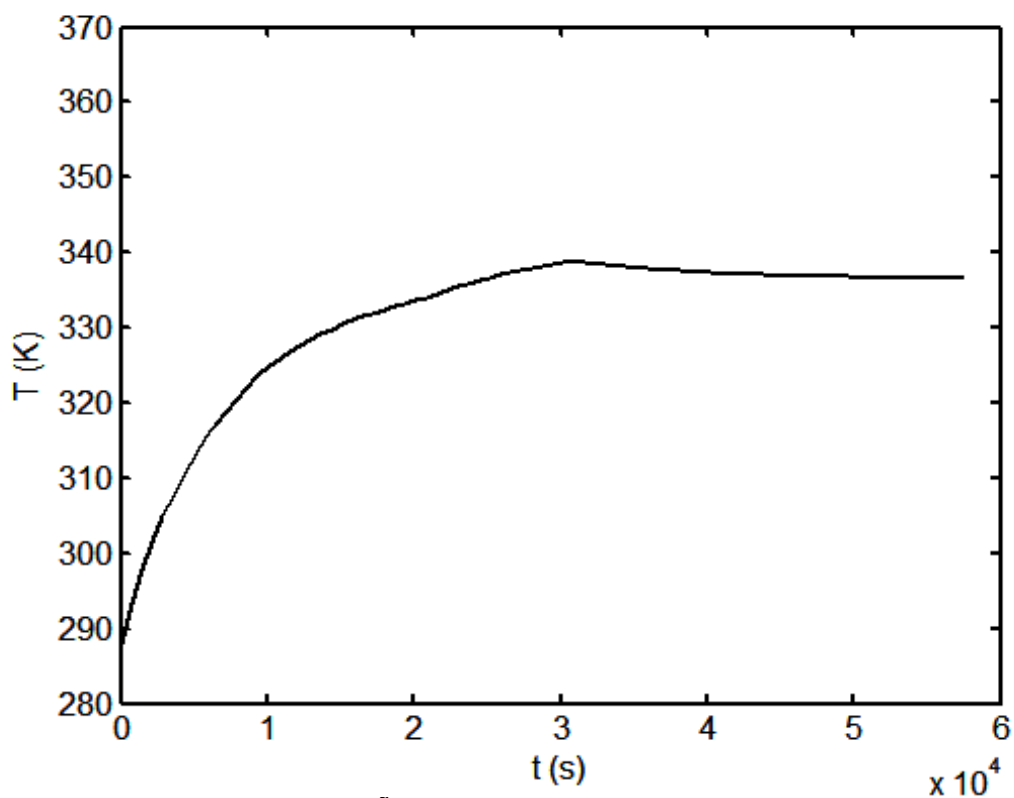


FIGURA 5.32 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO STBD M DCS ZONA-2  
FONTE: O AUTOR (2013)

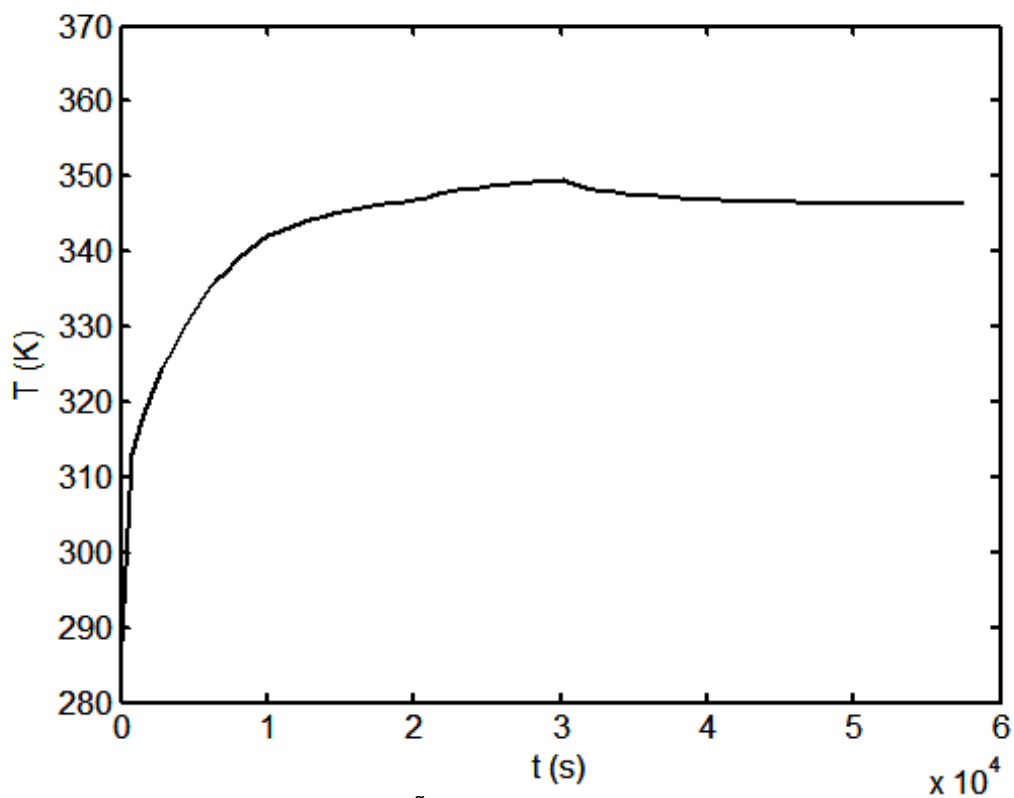


FIGURA 5.33 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO RADAR ZONA 5  
FONTE: O AUTOR (2013)

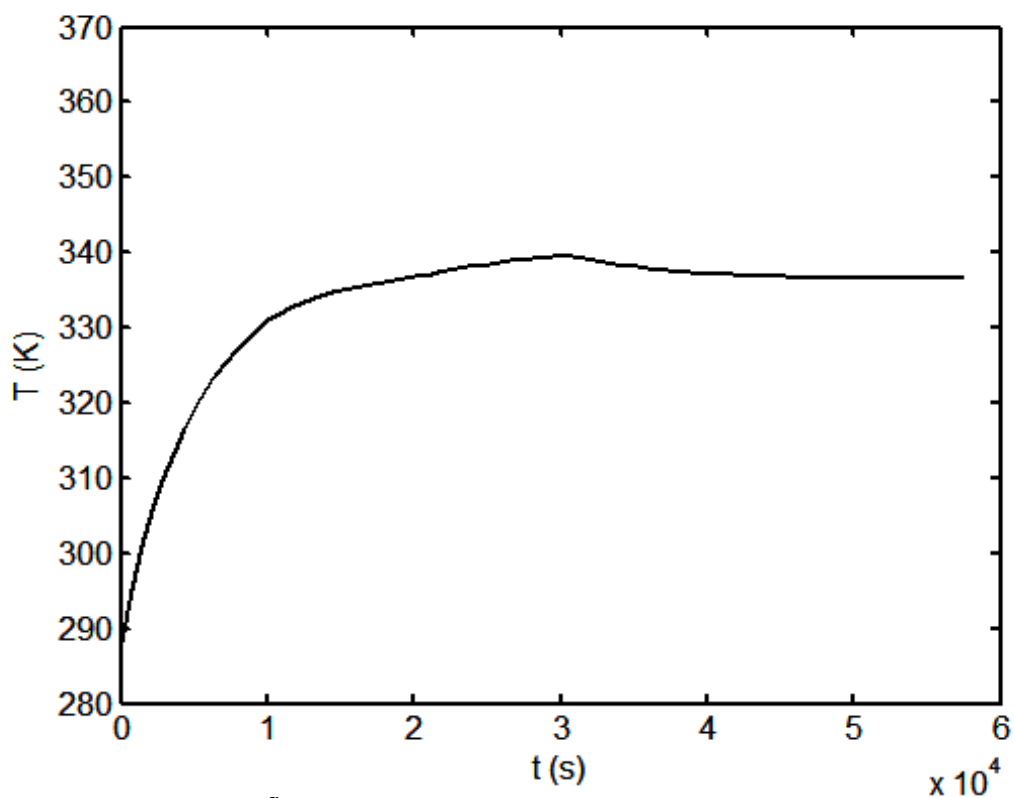


FIGURA 5.34 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO DRIVE DO MOTOR DE BORDO ZONA 3  
FONTE: O AUTOR (2013)

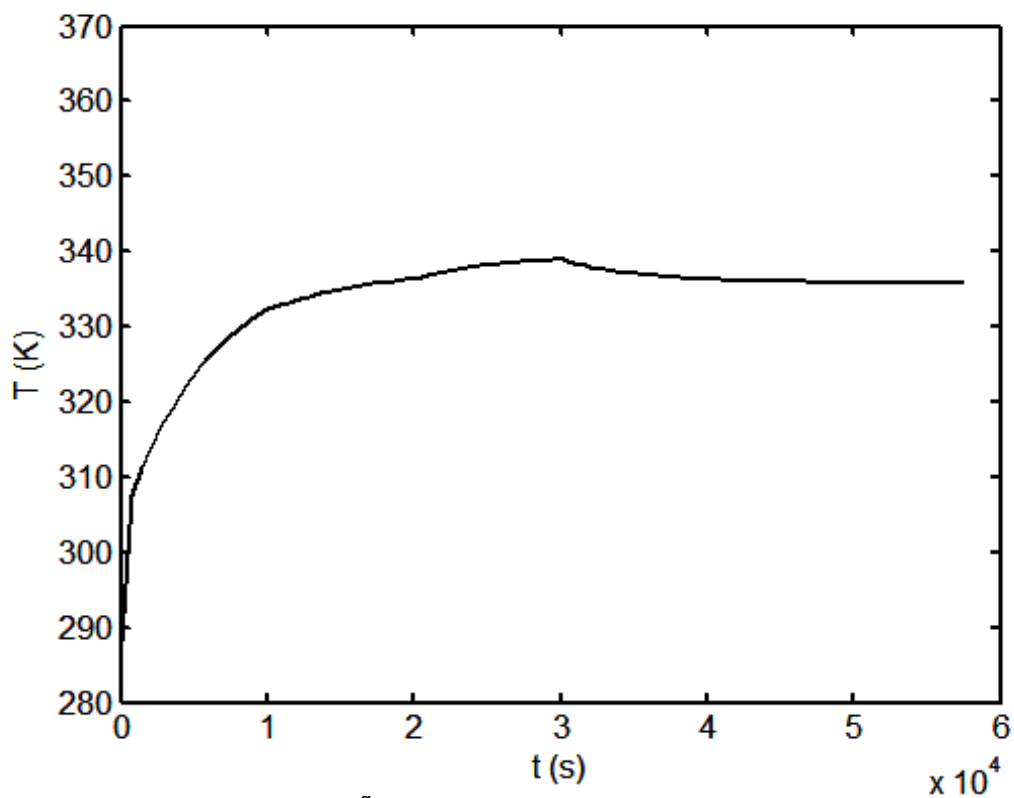


FIGURA 5.35 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA MOTOR DE BORDO ZONA 3  
FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.3 FOTOBIORREATOR

No presente estudo, a integração das equações diferenciais ordinárias ao longo do tempo, i.e., em regime transiente, requereu de 5 a 10 minutos para ser obtido o resultado final, isto é, o tempo final de simulação referente à fase em que o crescimento microalgal se estabiliza. O computador utilizado na realização da simulação foi um notebook Dell com processador Intel Pentium Dual-Core T2330 @ 1.6 GHz, 4 GB RAM rodando sistema operacional Linux Fedora em arquitetura de 64 bits.

Um código escrito em FORTRAN baseado no modelo matemático descrito no capítulo 3 desta Tese produziu os resultados numéricos. Os dados de entrada do modelo foram selecionados de acordo com a geometria, componentes, condições ambientais e de operação do fotobiorreator descrito no capítulo 4.

A microalga em crescimento no fotobiorreator do NPDEAS-UFPR é a *Scenedesmus sp.* colhida na região de Curitiba-PR. Os parâmetros de crescimento foram retirados da literatura, a menos das constantes estequiométricas referentes aos nutrientes que foram calculadas com base no trabalho de Dzuman (2013).

Primeiramente será apresentada uma comparação da curva de crescimento de biomassa microalgal simulada com dados experimentais levantados no NPDEAS-UFPR demonstrando a concordância entre as duas curvas. A geração de O<sub>2</sub> e consumo de CO<sub>2</sub> será avaliada. Também serão mostradas as curvas referentes ao consumo dos nutrientes e ao comportamento do pH.



### 5.3.1 Comparação dos resultados do modelo matemático com dados experimentais

A FIGURA 5.36 mostra o resultado de simulação do FBR para o crescimento de microalgas obtido com o modelo matemático para a condição de temperatura exterior entre 283 e 303 K, FIGURA 5.37. Esta condição foi selecionada por se aproximar das condições da realização do crescimento das microalgas no FBR que originou os dados experimentais levantados por Corrêa (2013). A velocidade do vento foi considerada nula. As concentrações iniciais foram: microalga  $0,104 \times 10^{-6}$ ; gás carbônico  $1,7 \times 10^{-7}$ ; oxigênio 0,0; nitrato  $3,478 \times 10^{-5}$ ; fosfato  $0,0571 \times 10^{-3}$ ; potássio  $0,104 \times 10^{-3}$ , e ferro  $0,8094 \times 10^{-6}$ . O tempo computacional de 90s.

Somente foram considerados dados de crescimento de algas até o 8º dia, que foi o dia em que o FBR passou por um repique, isto é, uma diluição, evento este que ainda não é contemplado pelo equacionamento matemático deste modelo. A inclusão deste fenômeno necessita a inclusão de uma taxa de diluição no termo de reação das equações de conservação de espécies. No mesmo gráfico, são mostrados os dados experimentais de crescimento de microalgas obtidos a partir da contagem de células em laboratório que foi convertida para concentração mássica ( $\text{g l}^{-1}$ ) e depois para frações mássicas (w/w). As barras de erro mostram as incertezas experimentais calculadas conforme descrito anteriormente neste trabalho. A comparação direta do resultado experimental e numérico permite afirmar que o modelo é capaz de capturar a resposta do FBR. Contudo, para o modelo ser considerado validado são necessárias mais comparações com experimentos realizados em diferentes condições. Desta forma seria possível o uso do modelo matemático para simulação, controle, projeto e otimização de FBRs de uma maneira geral. Importante observar em todos os resultados o aspecto cíclico nas curvas. Como a fotossíntese das microalgas e também os fenômenos térmicos dependem da radiação solar, aparecem nestes resultados o efeito do ciclo dia e noite. Isto demonstra a capacidade do modelo matemático em captar este fenômeno.

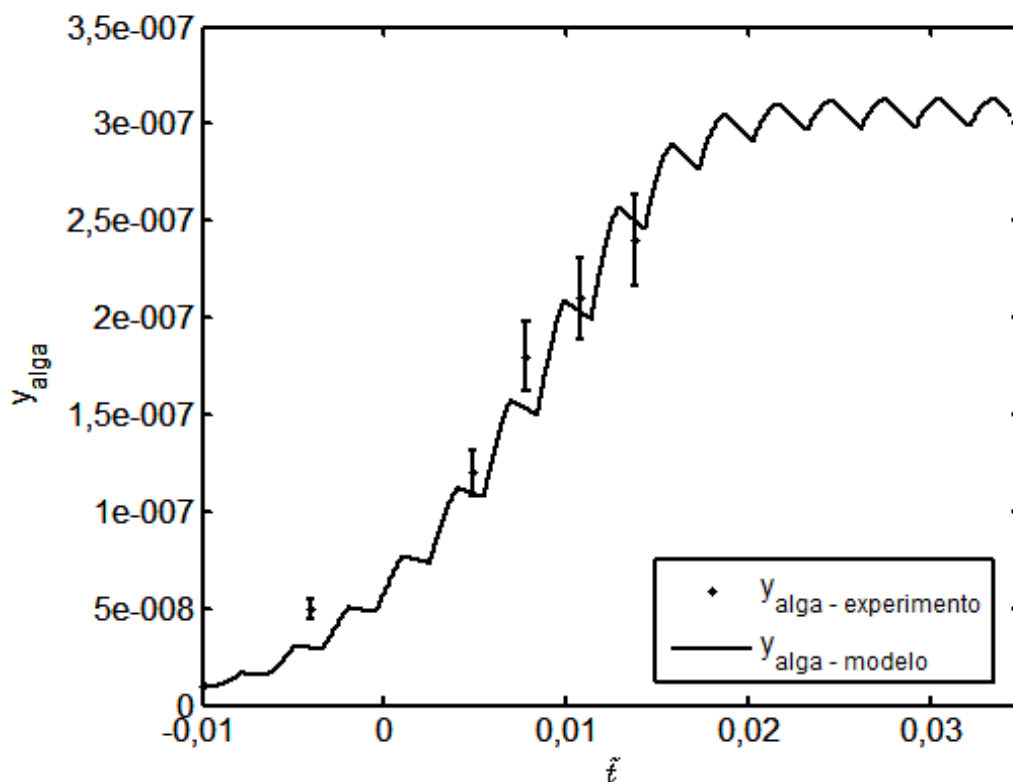


FIGURA 5.36 - EVOLUÇÃO TEMPORAL SIMULADA DA FRAÇÃO MÁSSICA DE MICROALGAS COMPARADA COM DADOS EXPERIMENTAIS.  
 FONTE: SIMULAÇÃO: O AUTOR (2013), DADOS EXPERIMENTAIS: CORRÊA (2013)

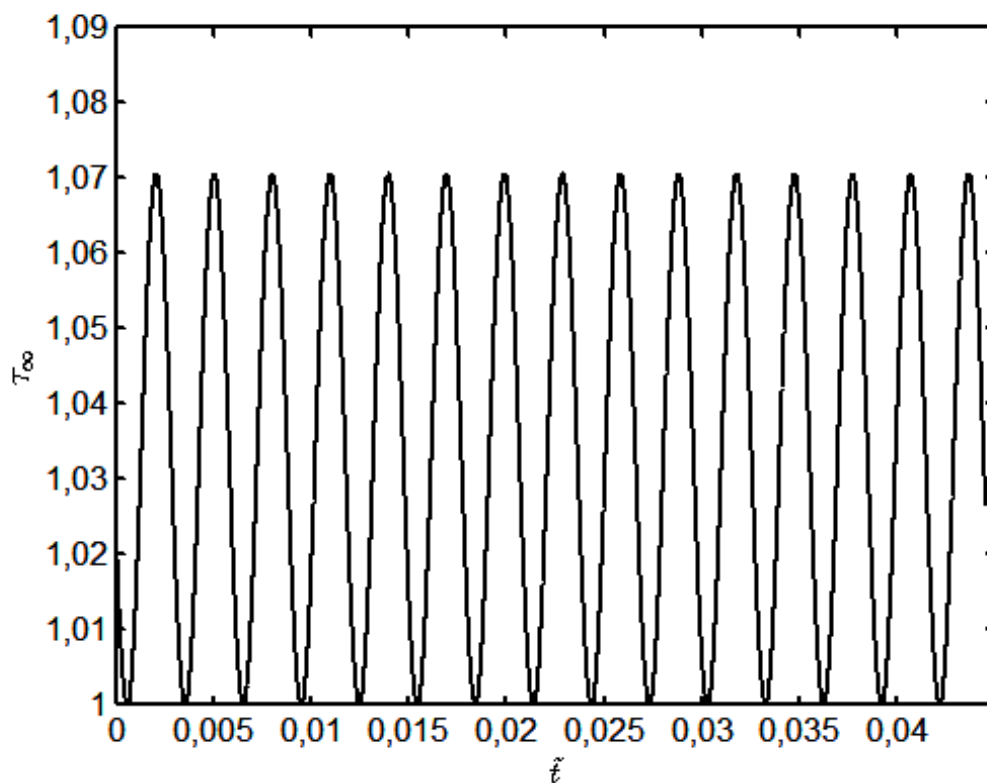


FIGURA 5.37 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR DO AMBIENTE EXTERNO ASSUMINDO TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS IGUAIS TODOS OS DIAS  
 FONTE: O AUTOR (2013)

A FIGURA 5.37 mostra a variação da temperatura do ar ambiente. Esta temperatura foi imposta como uma variação senoidal entre as temperaturas máximas e mínimas diárias. A evolução temporal da temperatura do meio de cultivo é mostrada na FIGURA 5.38. Observa-se que inicialmente o fotobiorreator é aquecido até a temperatura entrar em estado estacionário, isto é, o calor absorvido da radiação solar é dissipado ao ar ambiente. A curva da FIGURA 5.39 apresenta na forma adimensional a variação da temperatura da parede do elemento, ou seja, do tubo.

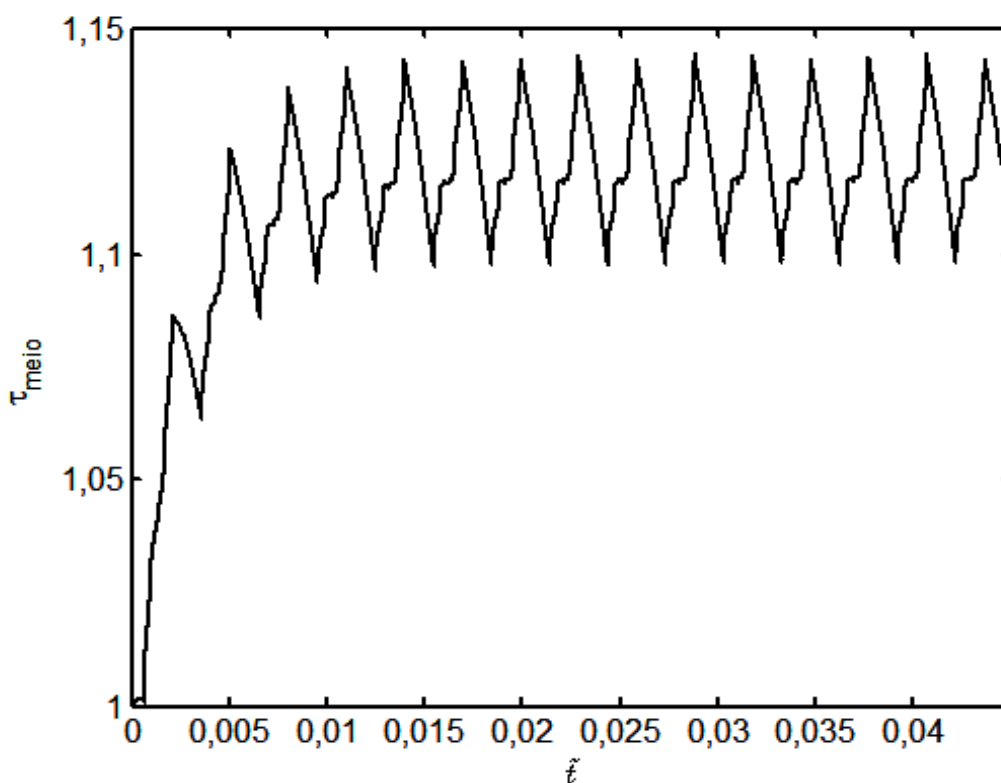


FIGURA 5.38 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO MEIO DE CULTIVO  
FONTE: O AUTOR (2013)

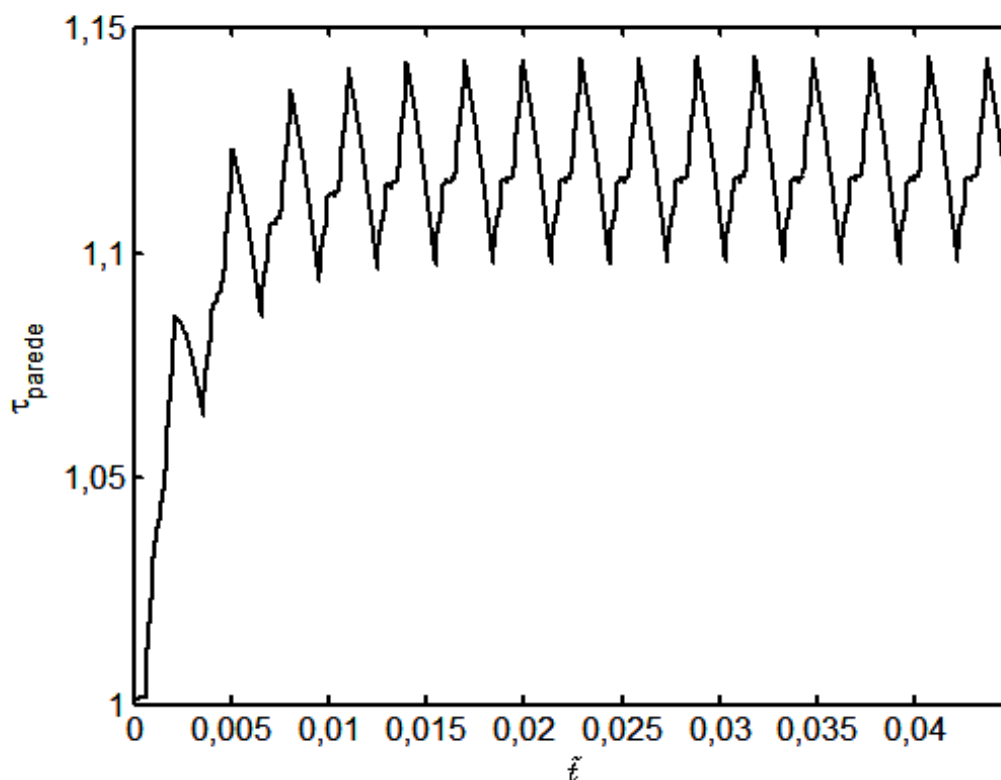


FIGURA 5.39 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DA PAREDE DO TUBO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.3.2 Resultados do modelo matemático para concentrações de $CO_2$ e $O_2$

A FIGURA 5.40 mostra a variação da fração mássica de  $CO_2$  no meio de cultivo no FBR ao longo da simulação. Verificam-se as tendências esperadas para a evolução do  $CO_2$ . Ar contendo  $CO_2$  é injetado no FBR, isto é, o gás é consumido pela fotossíntese e por isso a concentração se mantém baixa.

A FIGURA 5.41 mostra a variação da fração mássica de  $O_2$  no meio de cultivo no FBR ao longo da simulação. Verificam-se as tendências esperadas para a evolução do  $O_2$ . O gás oxigênio é produzido pela fotossíntese no período diurno e consumido no noturno como pode ser observado pelo comportamento em cíclico da curva.

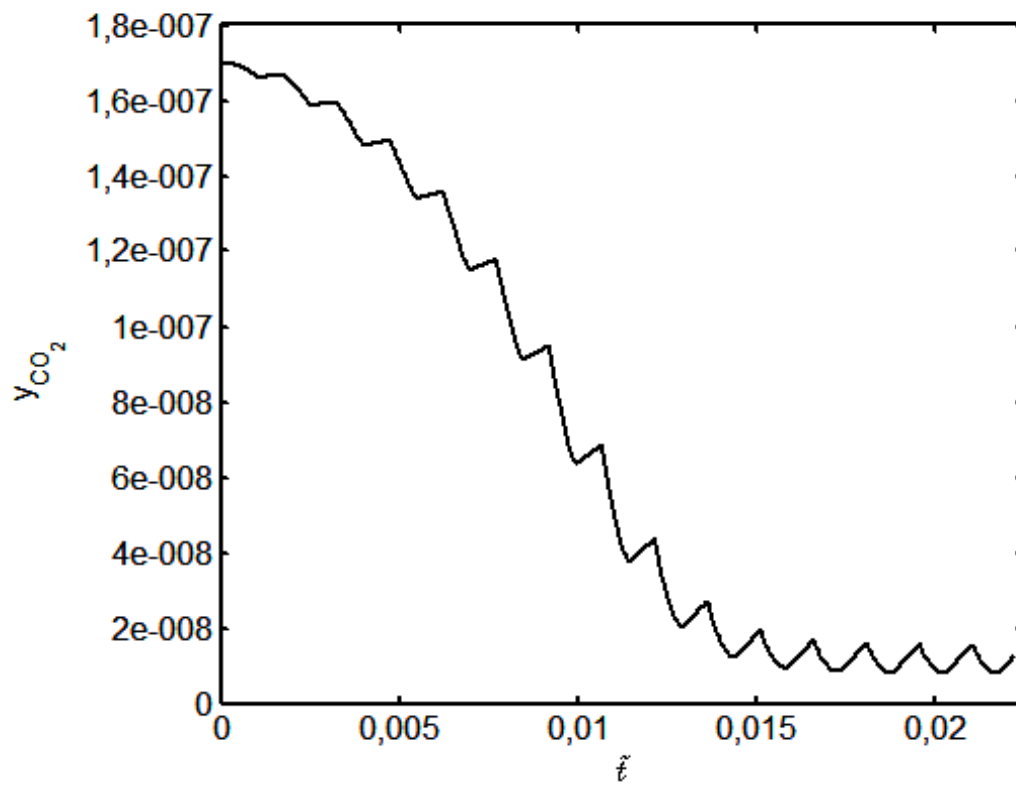


FIGURA 5.40 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE  $\text{CO}_2$   
FONTE: O AUTOR (2013)

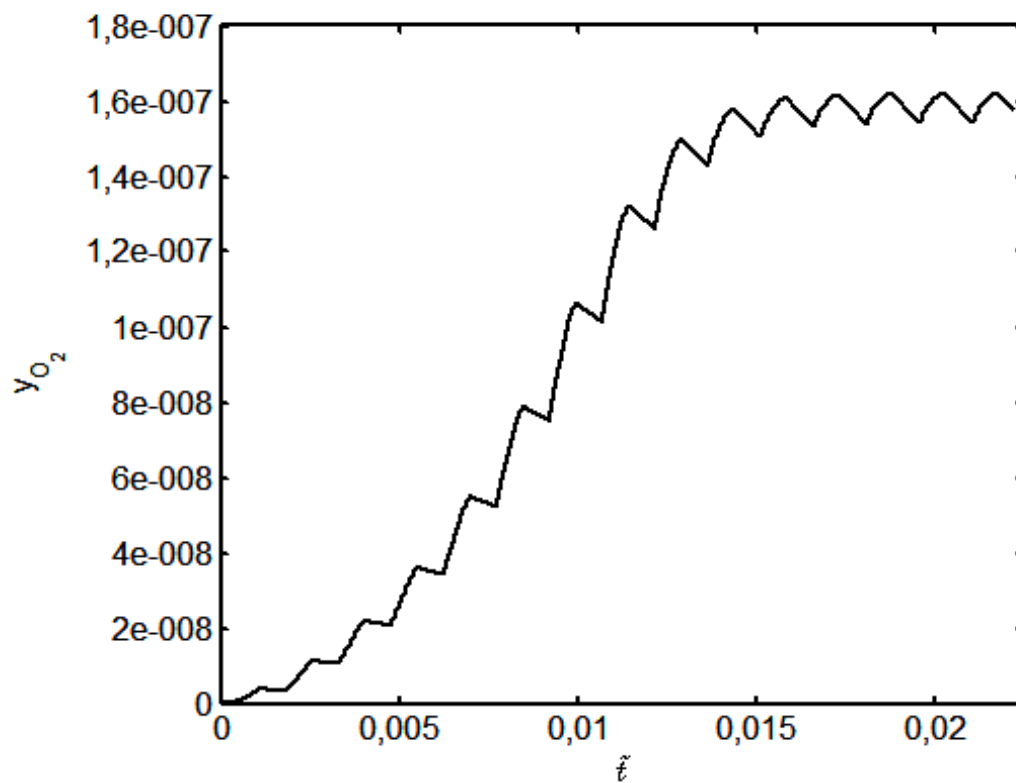


FIGURA 5.41 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE  $\text{O}_2$   
FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.3.3 Resultados do modelo matemático para concentrações de nutrientes

As constantes estequiométricas referentes ao consumo dos nutrientes como os íons nitrato e fosfato e os elementos potássio e ferro são mostradas na TABELA 5.8. Estas constantes foram calculadas com base nos dados levantados por Dzuman, (2013) TABELA 5.9, no laboratório do NPDEAS-UFPR. As variações nas concentrações dos nutrientes,  $\Delta w_i$ , durante um cultivo de 10 dias foram relacionadas com a variação de biomassa algal,  $\Delta w_{\text{alga}}$ , correspondente resultando na constante estequiométrica. Isto é,  $R_{i/\text{alga}} = \Delta w_i / \Delta w_{\text{alga}}$ . Sendo  $i$  a espécie em consideração.

TABELA 5.8 – CONSTANTES ESTEQUIOMÉTRICAS DOS NUTRIENTES

Nutriente	R (kg nutriente / kg alga)
Nitrato	0,09610
Fosfato	0,00592
Potássio	0,00792
Ferro	0,00125

FONTA: O AUTOR (2013)

TABELA 5.9 – CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E DE BIOMASSA ALGAL INICIAL E FINAL

Espécie	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	
	Inicial	Final
Nitrato	34,78	0,18
Fosfato	57,05	54,92
Potássio	104,28	101,43
Ferro	0,81	0,36
Biomassa seca	100,00	460,00

FONTA: ADAPTADO DE DZUMAN (2013)

As FIGURAS 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45 mostram as variações das concentrações de nitrato, fosfato, potássio e ferro ao longo da simulação. Verificam-se as tendências esperadas para a evolução das concentrações dos nutrientes. O nitrogênio fornecido pelo nitrato é incorporado nas células para síntese de proteínas. O fosfato, fonte de fósforo, entra na formação de material genético, moléculas estruturais e também nos processos de transferência de energia. Por sua vez, o potássio atua na regulação osmótica, pH e na conformação e estabilidade de

proteínas. Por sua vez, a falta de ferro no meio de cultivo altera negativamente a concentração de clorofila, e portanto, limita o crescimento microalgal.

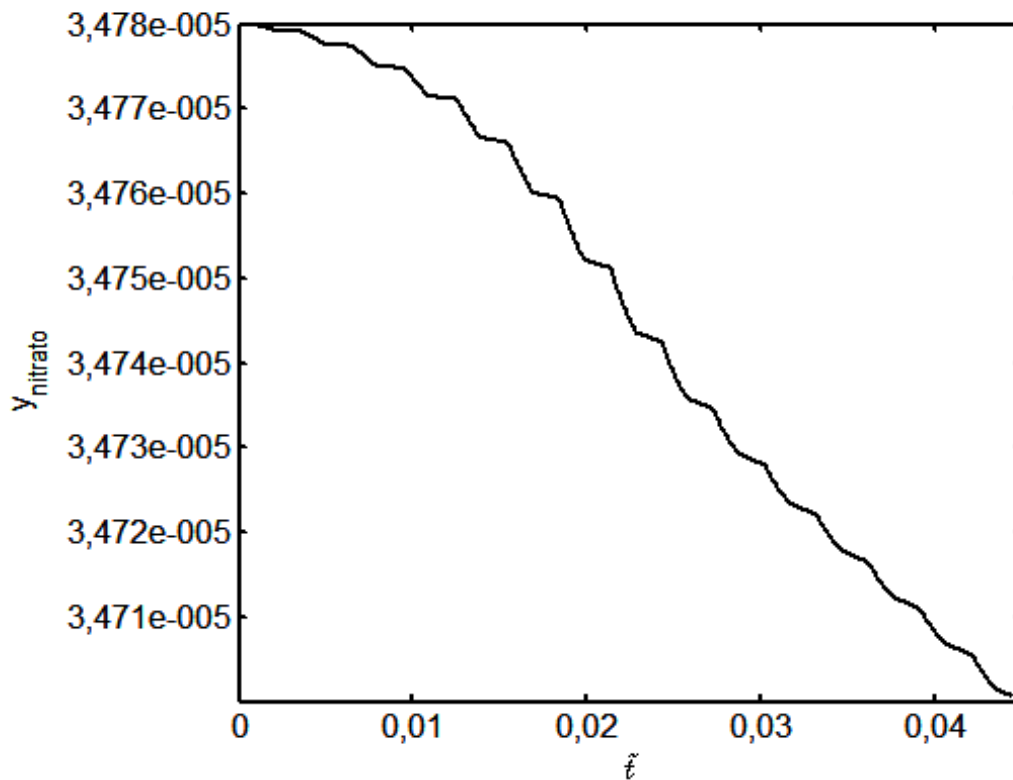


FIGURA 5.42 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE NITRATO  
FONTE: O AUTOR (2013)

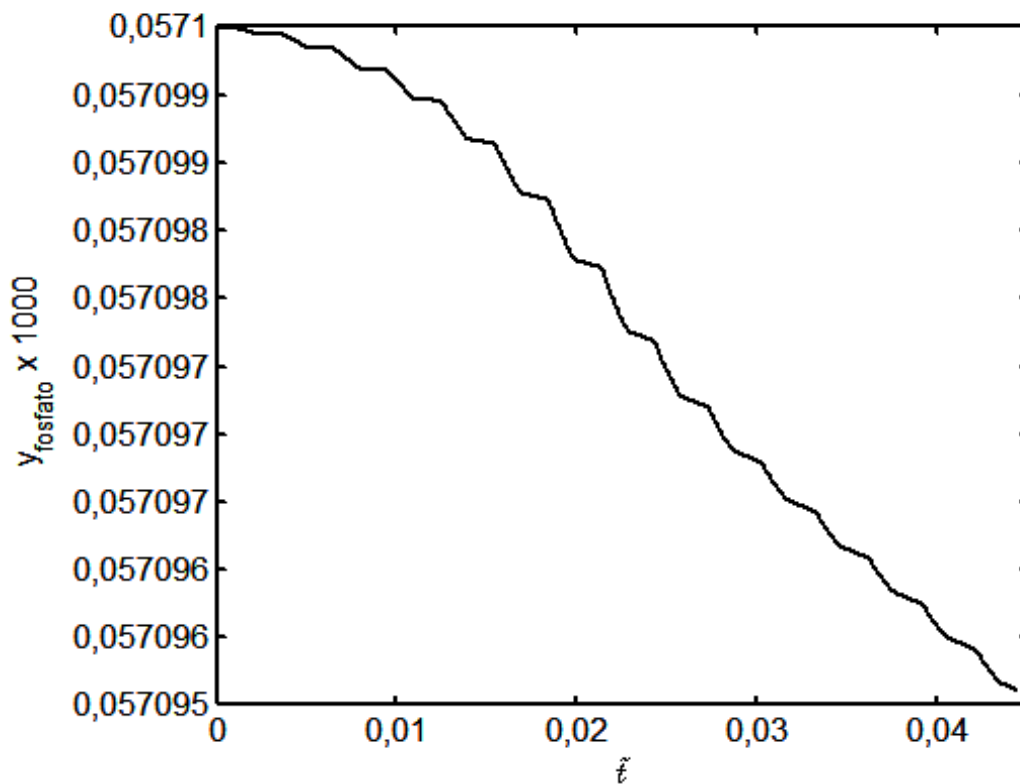


FIGURA 5.43 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE FOSFATO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

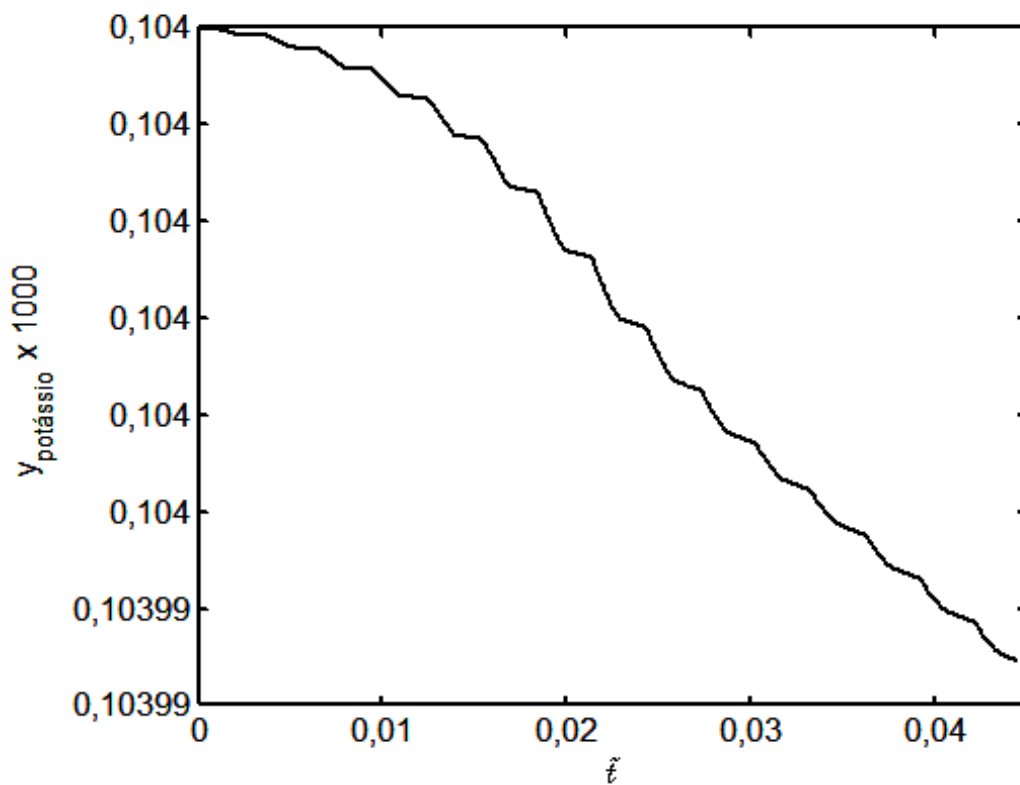


FIGURA 5.44 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO POTASSIO  
 FONTE: O AUTOR (2013)



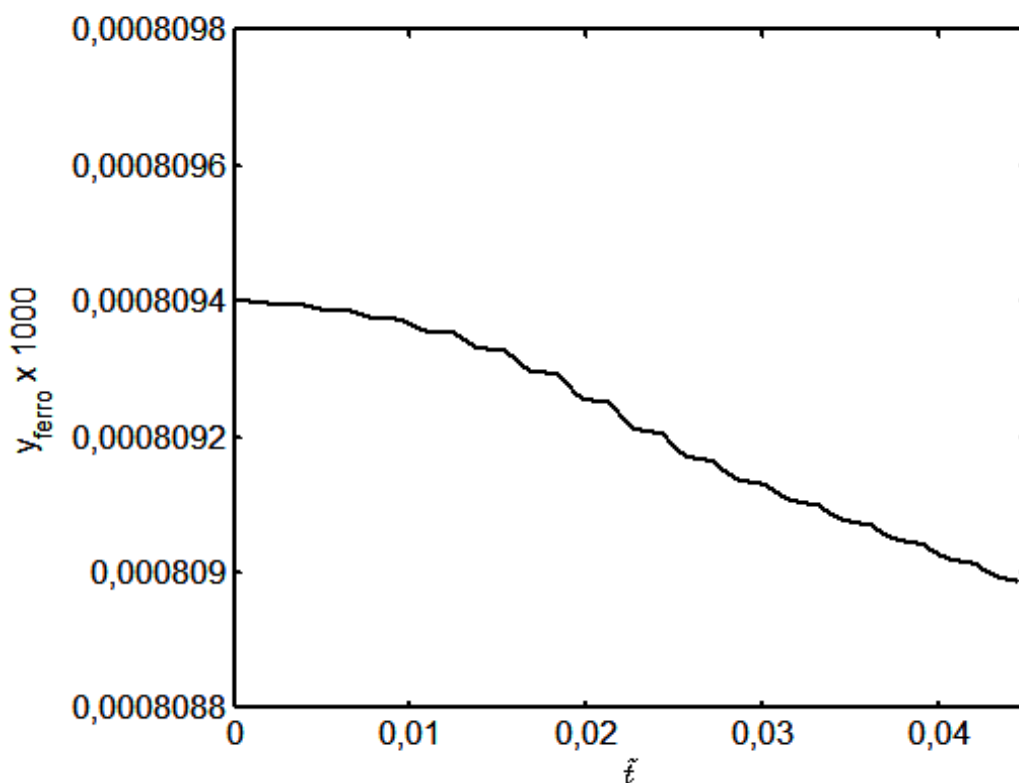


FIGURA 5.45 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE FERRO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

#### 5.3.4 Resultados do modelo matemático para demais espécies presentes no meio

A FIGURA 5.46 mostra a evolução temporal das demais espécies presentes no meio de cultivo e não contempladas nas equações de balanço de massa referentes à espécie alga,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , nitrato, fosfato, potássio nem ferro. Durante a fase mais acelerada de crescimento da espécie alga as demais espécies apresentam redução de concentração. Esta tendência muda e começa a subir quando a concentração da espécie algas estabiliza e cessa o crescimento. Quando o crescimento da espécie algas estabiliza, os nutrientes continuam a ser consumidos e portando as respectivas concentrações vão se reduzindo. Devido a isto, para respeitar o balanço de massa, é necessário que a concentração das demais

espécies cresça através do aumento de concentração das substâncias originárias das secreções celulares ou mesmo resultantes da decomposição de células mortas.

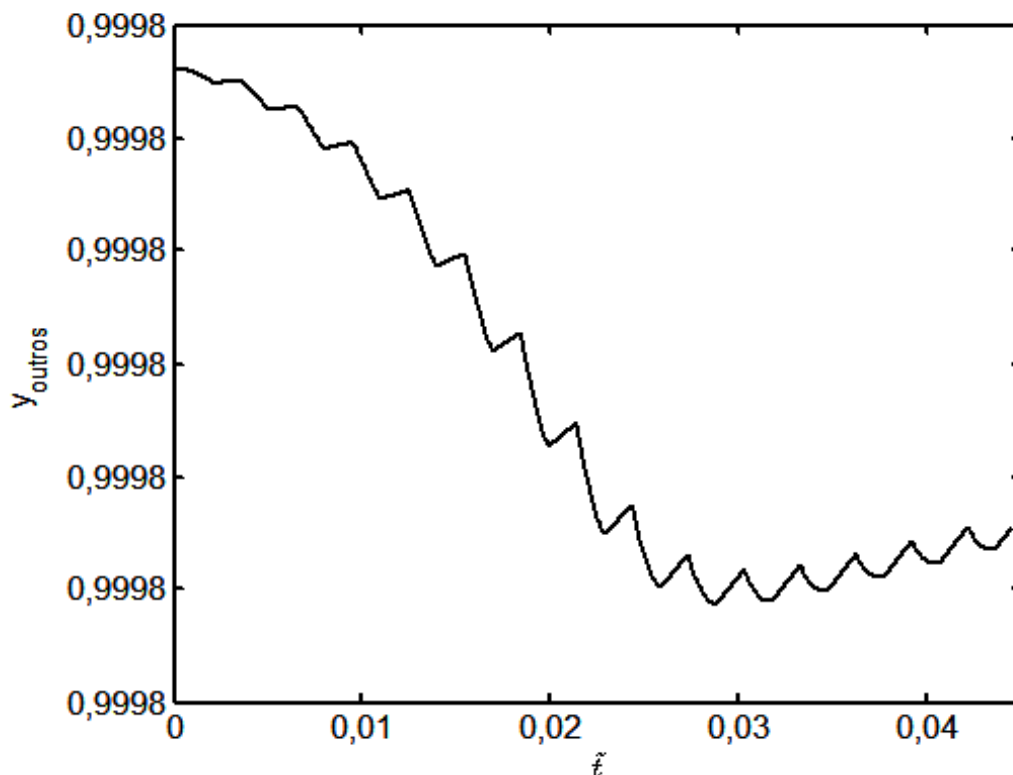


FIGURA 5.46 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS OUTRAS ESPÉCIES  
FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.3.5 Resultados do modelo matemático para pH

A FIGURA 5.47 mostra a variação do pH do meio de cultivo no FBR ao longo da simulação. Verificam-se as tendências esperadas para a evolução do pH, correlata à evolução do  $\text{CO}_2$  mostrada na FIGURA 5.40, isto é, durante a fase diurna o pH se mantém baixo devido ao consumo do  $\text{CO}_2$  e na fase noturna o pH sobe devido à geração de  $\text{CO}_2$ .

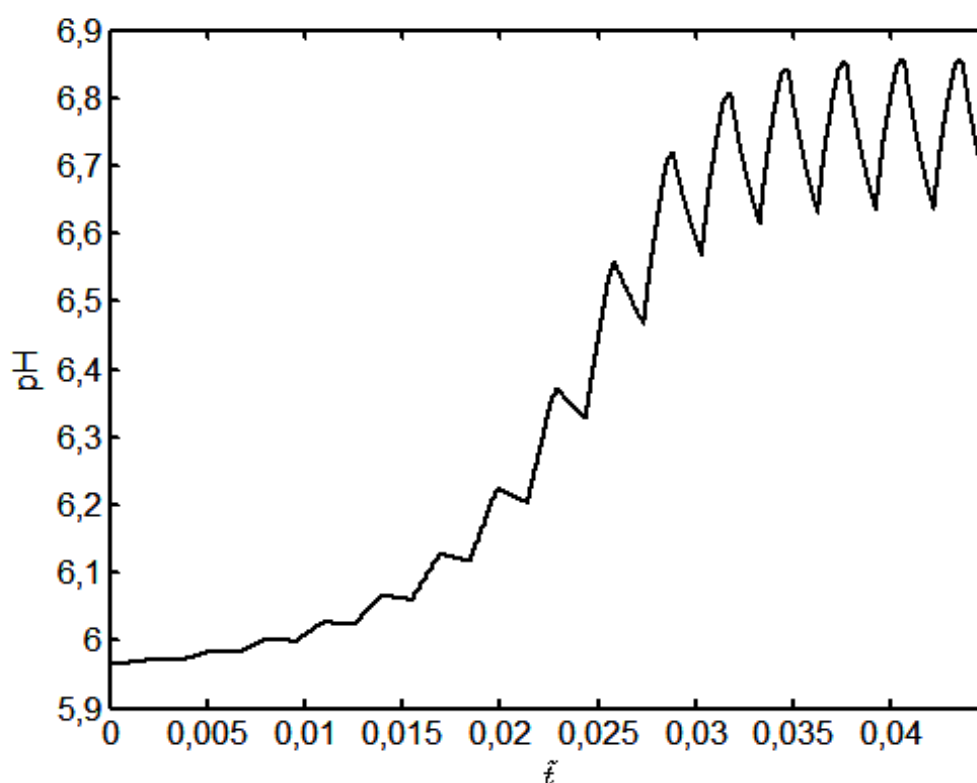


FIGURA 5.47 EVOLUÇÃO TEMPORAL SIMULADA DO pH DO MEIO NO FBR  
 FONTE: O AUTOR (2013)

### 5.3.6 Otimização da altura do fotobiorreator

A FIGURA 5.48 mostra as curvas de crescimento de microalgas do fotobiorreator. Cada curva foi simulada com um número de linhas de tubos, ou seja, altura do fotobiorreator diferente mantendo-se os demais parâmetros geométricos constantes. Esta análise paramétrica busca identificar o comportamento do fotobiorreator em função da altura do sistema. O objetivo é identificar a altura do sistema para a qual a produtividade de biomassa microalgal seja maximizada. Isto é, a taxa de crescimento das microalgas em relação ao volume total do fotobiorreator seja máxima mantendo-se a superfície de solo ocupada constante.

A análise da FIGURA 5.48 mostra que configurações com 5 e 10 linhas de tubos tem taxa de crescimento menor que as demais configurações. Contudo, a partir de 20 linhas de tubos, a taxa de crescimento e a concentração final de microalgas não mais se alteram. Isso demonstra que com alturas acima de 20 tubos, apesar do fotobiorreator se tornar maior não existe ganho de produtividade. Para se saber porque isso ocorre é necessário explorar com mais detalhes o comportamento das espécies em função do número de tubos e do comprimento do trajeto que as algas percorrem.

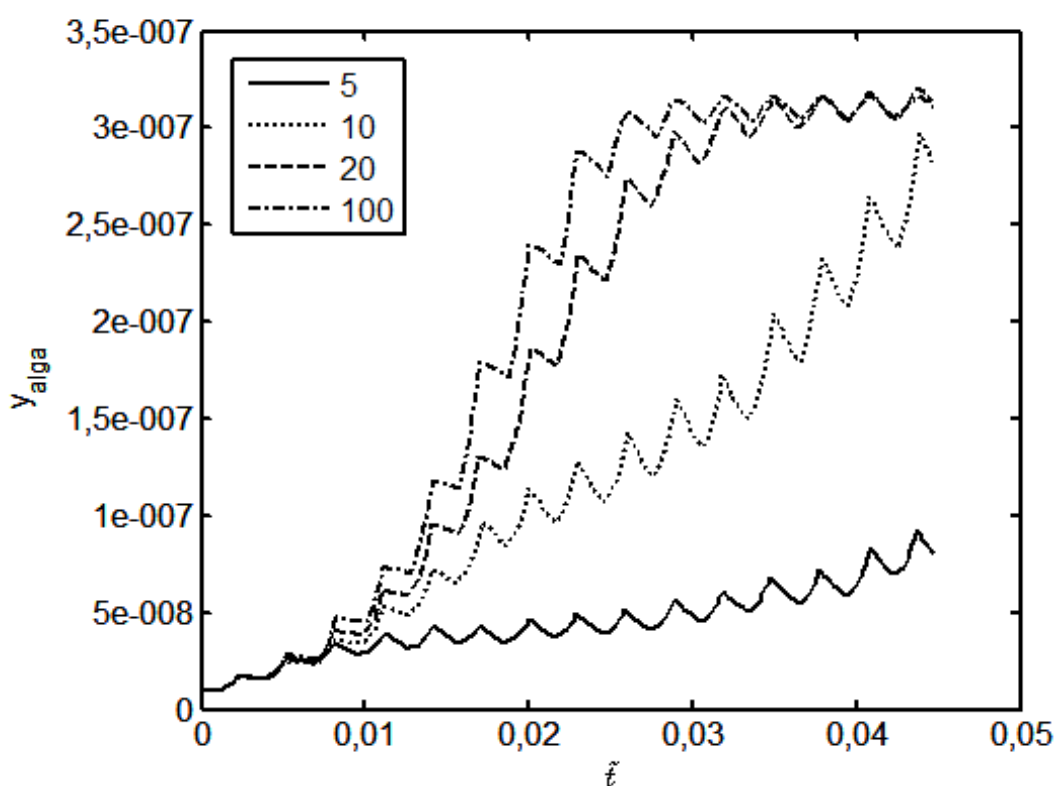


FIGURA 5.48 – CURVAS DE CRESCIMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE MICROALGAS PARA DIFERENTES NÚMEROS DE LINHAS DE TUBOS  
 FONTE: O AUTOR (2013)

O comportamento da concentração de microalgas em função da posição dentro do arranjo de tubos, isto é, em que linha a alga se encontra é mostrado na FIGURA 5.49. A medida que o tempo passa a concentração de algas aumenta e vai tomando uma forma sigmoide. No tempo correspondente ao regime estacionário as algas chegam a crescer a uma concentração maior quando a luminosidade e a concentração de  $\text{CO}_2$  estão em condições favoráveis e depois morrem até atingir o

equilíbrio com a taxa de manutenção. Importante observar que existe comportamento de crescimento até no máximo 25 tubos.

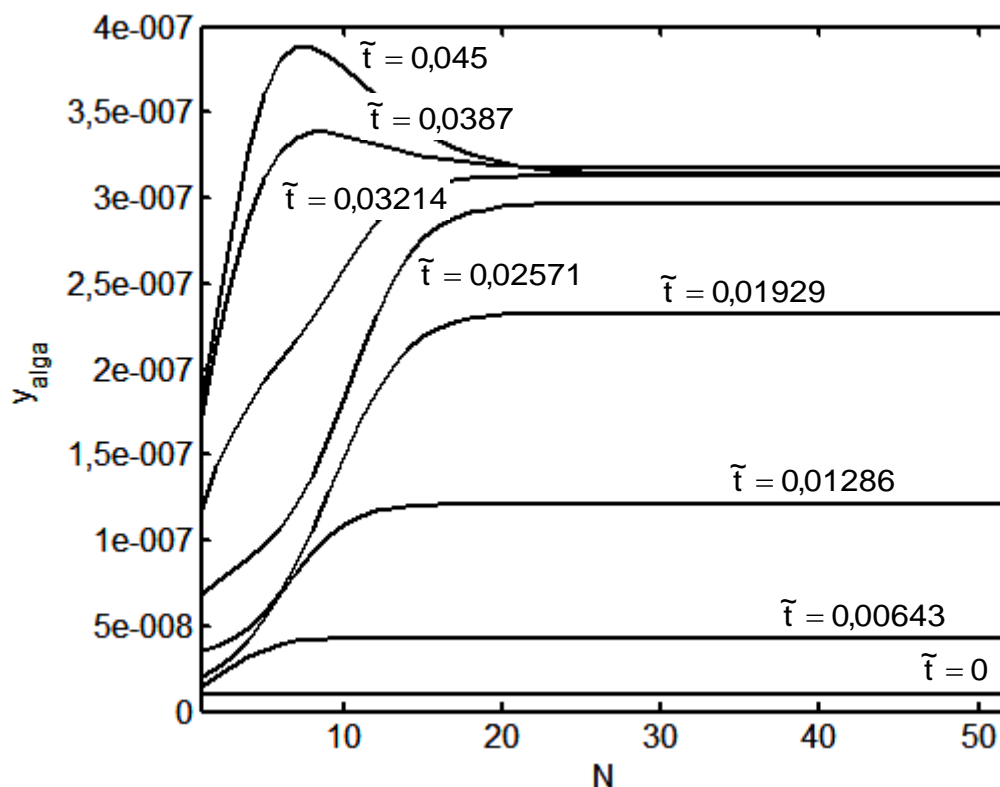


FIGURA 5.49 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MICROALGAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

O crescimento atingindo no máximo 25 tubos corresponde à máxima taxa de crescimento durante a fase exponencial. Observando-se a FIGURA 5.50 que mostra as curvas de concentração de  $\text{CO}_2$  em função do número de tubos e do tempo, nota-se que o  $\text{CO}_2$  é consumido e sua concentração baixa não mais permite uma alta taxa de crescimento das microalgas. Portanto, nesta configuração de fotobiorreator o elemento limitante está sendo não a luz, mas a disponibilidade de  $\text{CO}_2$ , o qual foi todo consumido e sua falta não permite que a concentração de biomassa algal aumente.

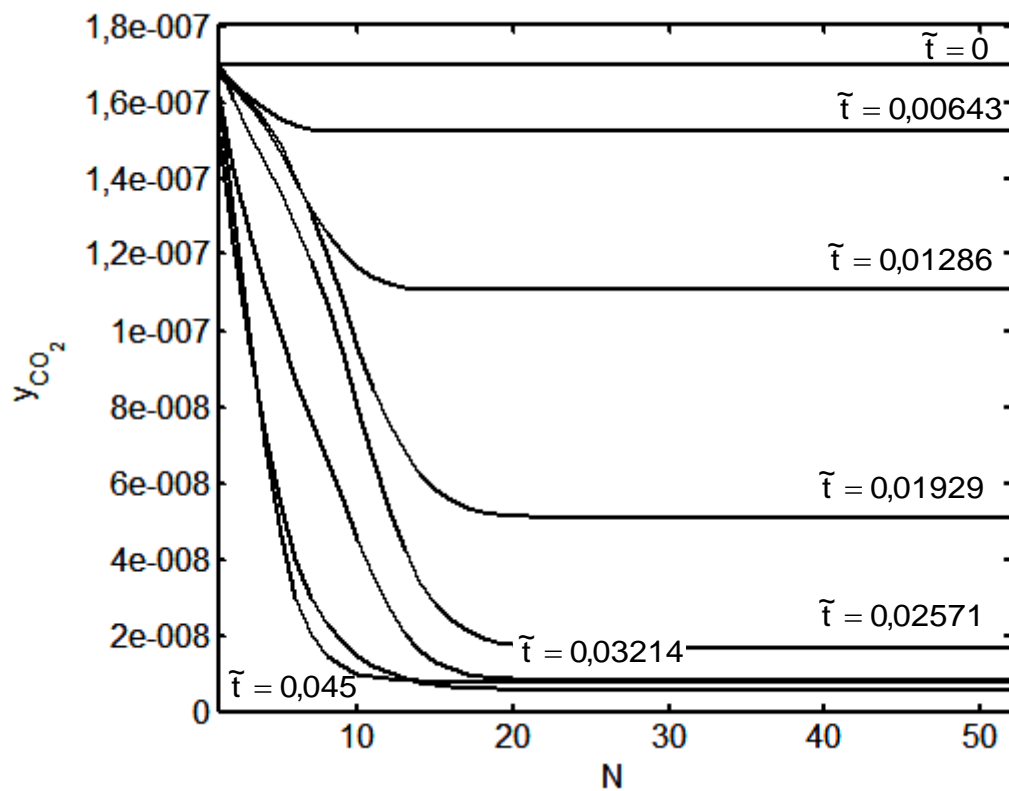


FIGURA 5.50 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

Da mesma forma, pode ser observado na FIGURA 5.51 o comportamento do O<sub>2</sub> em função do espaço e do tempo. A concentração de O<sub>2</sub> começa baixa e sobe até atingir o estado estacionário.

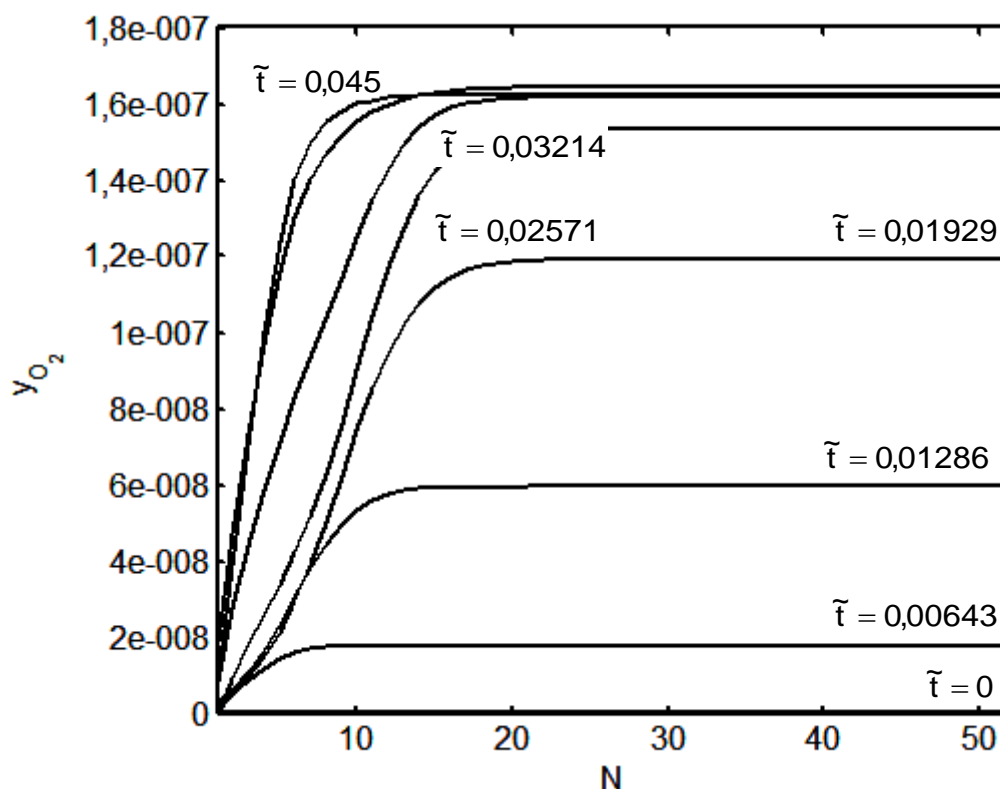


FIGURA 5.51 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE O<sub>2</sub> EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DO TEMPO  
 FONTE: O AUTOR (2013)

Neste ponto, tomando-se as derivadas máximas das curvas da FIGURA 5.48 que representam a taxa de crescimento e relacionando com o volume total do fotobiorreator é obtida a FIGURA 5.52. Esta figura mostra que existe um ponto de máxima produtividade na região da altura adimensional de 1,1 que corresponde a 20 linhas de tubos na altura. Isso ocorre porque abaixo de 20 tubos, o aumento do número de tubos aumenta a derivada máxima do crescimento das algas mais rápido do que o ganho de volume, mas, acima disso a derivada não aumenta mais. Contudo o volume continua aumentando e isso reduz a relação entre produtividade e volume. Este procedimento foi calculado com a seguinte função objetivo a ser maximizada:

$$\bar{p} = \frac{(Y_{Alga}^1 - Y_{Alga}^0) \cdot \tilde{V}}{\tilde{A} \cdot \tilde{t}} \quad (5.3)$$

onde,  $Y_{Alga}^1$  é a concentração final de microalgas,  $Y_{Alga}^0$  é a concentração inicial de microalgas,  $\tilde{V}$  é o volume do FBR,  $\tilde{P}$  é a produtividade,  $\tilde{t}$  é o tempo e  $\tilde{A}$  é a superfície de solo ocupada pelo FBR. Todas estas variáveis são adimensionais.

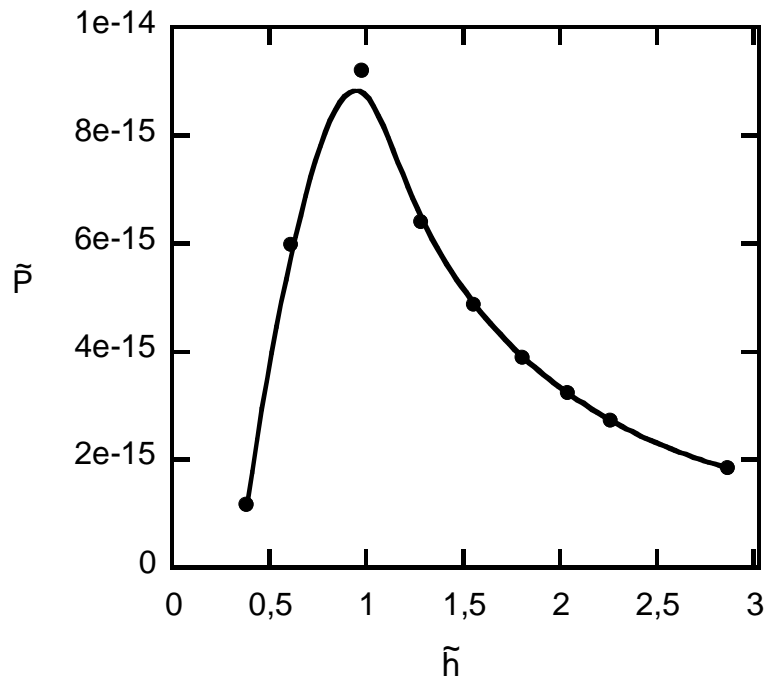


FIGURA 5.52 – PRODUTIVIDADE EM FUNÇÃO DA ALTURA DO FBR MANTENDO A SUPERFÍCIE OCUPADA FIXA  
FONTE: O AUTOR (2013)



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia simplificada, de ordem reduzida, para a modelagem e simulação numérica aplicada a engenharia de sistemas. O modelo encontra-se em uma classe de modelos intermediários sob o ponto de vista da complexidade: este modelo não é tão simples quanto os do tipo volume de controle onde as variáveis do componente ou sistema em análise não tem dependência espacial e nem tão complexo quanto os modelos com malhas bi ou tridimensionais. Apesar das simplificações adotadas, o modelo proposto mostrou-se adequado na determinação de campos de temperatura, umidade relativa e concentrações mássicas de espécies em grandes sistemas com tempos computacionais baixos. Assim, tomando-se como base a lista de objetivos específicos do início desta Tese, podem ser listadas as seguintes conclusões:

- I. Foi proposta de uma modelagem matemática de ordem reduzida como estratégia para simplificação dos equacionamentos matemáticos encontrados em engenharia de sistemas utilizando diversas ferramentas de análise. A inclusão de todo um grande sistema de engenharia dentro de uma malha de elementos de volume e sua solução torna este trabalho importante do ponto de vista do ineditismo.
- II. Foram desenvolvidos modelos matemáticos para os sistemas: i) acondicionamento de eletrônicos tipo PEBB (*Power Electronic Building Block*); ii) gerenciamento térmico de navio inteiramente elétrico, e iii) fotobiorreator compacto;
- III. Foi desenvolvido um gerador de malha para representar geometrias complexas com precisão (e.g., casco de um navio de grande porte). O tempo de geração de malha de um navio foi de menos de 5 minutos;

- IV. Foi desenvolvido um procedimento numérico para realizar a análise transiente ou em regime permanente em um mesmo aplicativo computacional. Este procedimento tomou menos de 10 minutos para análises em estado estacionário e menos de 50 minutos para regime transiente;
- V. O modelo PEBB foi ajustado e validado experimentalmente;
- VI. Foi realizada uma análise paramétrica do sistema PEBB e do navio inteiramente elétrico, utilizando o modelo PEBB ajustado e validado experimentalmente;
- VII. A resposta térmica e de umidade relativa de um navio virtual inteiramente elétrico, foi avaliada. O modelo incluiu circuitos de refrigeração dos elementos com fluido, o que não existe em outras modelagens.
- VIII. Os resultados numéricos do modelo do fotobiorreator foram comparado com resultados experimentais.. O processo de otimização mostrou que a altura ótima para o sistema em análise é de 20 camadas de tubos (equivalente a 3 metros de altura).

Como produto final do trabalho, além do presente texto, foram disponibilizados três aplicativos computacionais para simulação de sistemas integrados de engenharia baseados no método de elementos de volume dedicados a acondicionamento de eletrônicos, navios elétricos e sistemas fotobiorreatores, além de três geradores de malha de elementos de volume para os mesmos sistemas.

Esta ferramenta aqui apresentada permite o uso de malhas esparsas para discretizar o domínio e ainda obtém convergência numérica. Ela foi aplicada em exemplos de engenharia de sistemas mostrou-se precisa e rápida, em grau suficiente, para ser utilizada na solução de diversos problemas. E, espera-se que seja utilizada em projeto térmico, otimização e controle.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos não tratados mais detalhadamente no presente trabalho ou pouco abordados na literatura podem ser mais aprofundados. Aqui estes pontos são reunidos e comentados.

- I. O primeiro ponto a ser sugerido como continuidade do trabalho é a inclusão de uma rotina no aplicativo computacional para análise transiente baseado num esquema implícito de integração, o qual é incondicionalmente estável, independentemente do tamanho do passo no tempo. O código atual utiliza um esquema explícito. Este esquema não pode trabalhar com passos de integração tão grandes como os esquemas implícitos. Desta forma, o esquema implícito pode ser ainda mais rápido e possibilitar uma gama maior de análises do sistema em estudo.
- II. A inclusão do cálculo da exergia do sistema possibilitaria uma otimização exergética. Isto é, reduzindo a geração de entropia do sistema. Tal análise possibilita a redução das irreversibilidades ao mínimo.
- III. Ainda, aproveitando o gerador de malhas customizado para geração do casco do navio em formato real, podem ser geradas malhas para diferentes geometrias partindo-se de um arquivo do tipo STL que pode ser gerado a partir de qualquer software de CAD. Isto aumenta a flexibilidade do aplicativo computacional, o qual pode ser utilizado para inúmeros sistemas com formas geométricas complexas.
- IV. No caso do sistema fotobiorreator, há pelos menos três sugestões de trabalhos futuros. A primeira é realizar uma otimização global do sistema fotobiorreator. O aplicativo desenvolvido já foi utilizado para análises paramétricas preliminares e para a otimização local referente à altura sistema. O próximo passo natural é realizar outras otimizações com diferentes graus de liberdade e finalmente realizar a otimização global. Com isso seria identificando o conjunto de parâmetros de

projeto e de operação que maximizam a produtividade em relação à área de superfície ocupada pelo sistema.

- V. Além disso, o modelo do fotobiorreator com malha pode ser mais explorado com o objetivo de se identificar os ganhos em se analisar o fotobiorreator com o modelo com malha quando comparado com o modelo preliminar o qual não usa malha.
- VI. O segundo ponto referente ao sistema fotobiorreator é realizar melhorias no componente gaseificador/degaseificador visando aumentar a concentração do CO<sub>2</sub> disponível para o crescimento da biomassa microalgal. Como foi identificado neste trabalho, a concentração de CO<sub>2</sub> no sistema é um fator determinante à produtividade do fotobiorreator.
- VII. Por último, a análise da energia luminosa disponível em cada tubo do fotobiorreator via um algoritmo de *ray tracing* não está presente na literatura, pelo menos, não dentro do conhecimento deste autor, o que caracteriza mais um aspecto inovador. Neste ponto, durante o desenvolvimento do aplicativo computacional, foram realizados alguns testes visando avaliar a concordância do algoritmo com medições locais. Isto foi feito inicialmente com uma fotografia do interior do feixe de tubos a qual foi processada no software livre Octave com seu pacote de processamento de imagens visando identificar o decaimento do fluxo luminoso ao longo do eixo transversal do fotobiorreator. Esta análise mostrou-se promissora, portanto, fica como sugestão para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- AIBA, S. **Growth kinetics of photosynthetic microorganisms**. Adv. Biochem. Eng., v. 23, p. 85-156, 1982.
- AMY, J. **Load analysis 2007 for ESRDC3 REV2.xls**, Electric Ship Research and Development Consortium, 2008.
- ARAÚJO, O. Q. F.; GOBBI, C. N.; CHALOUB, R. M., COELHO, M. A. Z. **Assessment of the Impact of Salinity and Irradiance on the Combined Carbon Dioxide Sequestration and Carotenoids Production by *Dunaliella salina*: a Mathematical Model**, Biotechnology and Bioengineering, 102 (2009) 425-435, 2009.
- ARTEAGA-PEREZ, L. E.; CASAS, Y.; PERALTA, L. M.; KAFAROV, V.; DEWULF, J.; GIUNTA, P. **A auto-sustainable solid oxide fuel cell system fueled by bio-ethanol, Process simulation and heat exchanger network synthesis**. Chemical Engineering Journal, 150 (2009) 242-251, 2009.
- ASKRI, F.; BEN SALAH, M.; JEMNI, A.; BEN NASRALLAH, S. **Optimization of hydrogen storage in metal-hydride tanks**. International Journal of Hydrogen Energy, 34 (2009) 897-905, 2009.
- BABU, B. V.; CHAURASIA, A. S. **Dominant design variables in pyrolysis of biomass particles of different geometries in thermally thick regime**. Chemical Engineering Science, 59 (2004) 611-622, 2004a.
- BABU, B. V.; CHAURASIA, A. S. **Pyrolysis of biomass: improved models for simultaneous kinetics and transport of heat, mass and momentum**. Energy Conversion and Management, 45 (2004) 1297-1327, 2004b.
- BAGNOLI, P. E.; PADOVANI, C.; PAGNI, A.; PASQUINELLI, G., **A thermomechanical solver for multilayer power electronic assemblies integrated into the DJOSER thermal simulator**, Journal of Electronic Packaging 133:1 (2011) Art. No.: 011005
- BALMANT, W.; D'AQUINO, C. A.; RIBEIRO, R. L. L.; MARIANO, A. B.; TAHER, D. M.; LEMOS, J. S.; VIANNA NETO, J. X, **Stoichiometric model of the cultivation of microalgae in industrial systems**. 21<sup>st</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, October 24-28, Natal, RN, Brazil, 2011.
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. 2<sup>a</sup> Ed, Wiley, New York, 1995.
- BEJAN, A. **Heat transfer**. Wiley, New York, 1993.
- BLANCO, D. L.; NAGANO, K.; MORIMOTO, M.; **Steady state vapor compression**

**refrigeration cycle simulation for a monovalent inverter-driven water-to-water heat pump with a desuperheater for low energy houses**, International Journal of Refrigeration, 35 (2012) 1833-1847, 2012.

BOEHME, R.; PARISE, J. A. R.; PITANGA MARQUES, R. **Simulation of multistream plate-fin heat exchangers of an air separation unit**. Cryogenics, 43 (2003) 325-334, 2003.

BOUROUIS, M.; CORONAS, A.; ROMERO, R. J.; SIQUEIROS, J.; **Purification of seawater using absorption heat transformers with water – (LiBr+LiI+LiNO<sub>3</sub>+LiCl) and low temperature heat sources**, Desalination, 166 (2004) 209-214, 2004.

BOYADJIEV, C.; MERCHUK, J. C. **On the modeling of an airlift photobioreactor**. Journal of Engineering Thermophysics, v. 17, n. 2, p. 134-141, 2008.

BULFIN, B.; MURPHY, B. E.; LUBBEN, O.; DRASNIKOV, S. A.; SHVETS I. V. **Finite element method simulations of heat flow in fixed bed solar water splitting redox reactors**. International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012) 10028-10035, 2012.

CASTRO, J.; OLIVA, A.; PEREZ-SEGARRA, C. D.; OLIET, C. **Modelling of the heat exchangers of a small capacity, hot water driven, air-cooled H<sub>2</sub>O-LiBr absorption cooling machine**. International Journal of Refrigeration 31 (2008) 75-86, 2008.

CHISTI, Y. **Biodiesel from microalgae beats bioethanol**. Trends in Biotechnology, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2008.

CHISTI, Y. **Biodiesel from microalgae**, Biotechnology Advances 25 294-306, 2007.

CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. **Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate**. International Journal of Heat and Mass Transfer 18, 1323-1329. 1975.

CONTRERAS, A.; GARCIA, F.; MOLINA GRIMA, E.; MERCHUK, J. C., **Influence of sparger on energy dissipation, shear rate, and mass transfer to sea water in a concentric-tube airlift bioreactor**. Enzyme and Microbial Technology, v.25, p. 820-830, 1999.

CORNET, J. F.; DUSSAP, C. G.; GROS, J. B. **Kinetics and energetics of photosynthetic micro-organisms in photobioreactors**. Advances in Biochemical Engineering Biotechnology, v. 59, p. 155-224, 1998.

CORRÊA, D. O. **Cultivo semicontínuo de uma microalga do gênero Scenedesmus em fotobiorreator tubular compacto para produção de biodiesel e caracterização do sistema de cultivo**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Paraná, 2013.

DIAS, F. G.; SOUZA, J. A.; ORDONEZ, J. C.; VARGAS, J. V. C.; HOVSAPIAN, R.; AMY JR, J. V.; **Notional all-electric ship thermal simulation and visualization**. In: **Proceedings of the 2009**. IEEE Electric Ship Technologies Symposium,

Baltimore, Maryland. 2009 ESTS Proceedings. New York: IEEE, 2009.

DILAY, E.; RIBEIRO, R.L.L.; PULLIAM, R.; ORDONEZ, J.C.; VARGAS, J.V.C. **The transient response of a compact photobioreactor for microalgae cultivation.** 13<sup>rd</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Uberlandia, MG, Brazil, 2010.

DILAY, E.; VARGAS, J. V. C.; ORDONEZ, J. C.; HOVSAPIAN, R.; CHALFANT, J.; CHRYSOSTOMIDIS, C. **A mesh generation strategy for representing hull geometry in ESRDC ship thermal simulation and visualization.** Proceedings of the 2012 Grand Challenges in Modeling and Simulation, Genoa, Italy, GCMS Proceedings, 2012

DILAY, E.; VARGAS, J. V. C.; ORDONEZ, J. C.; YANG, S.; SCHRATTENECKER, R.; COLEMAN, M.; CHIOCCHIO, T.; CHALFANT, J.; CHRYSOSTOMIDIS, C., **The experimental validation of a transient power electronic building block (PEEB) mathematical model.** Applied Thermal Engineering, 60 (2013) 411-422, 2013.

DING, W. K.; FAN, J. F.; HE, Y. L.; TAO, W. Q.; ZHENG, Y. X.; GAO, Y. F.; SONG, J.; **A general simulation model for performance prediction of plate fin-and-tube heat exchanger with complex circuit configuration,** Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 3106-3116, 2011.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, A. A. **Solar energy thermal processes.** Wiley, pp. 34-37, New York, 1974.

DZUMAN, M. J.; **Efeito da reciclagem repetida do meio de cultivo da microalga *Scenedesmus sp* para a produção de biodiesel.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2013.

EDITORIAL. Journal of heat transfer editorial policy statement on numerical accuracy. ASME J. Heat Transfer 116 (1994) 797–798, 1994.

FEAP – A Finite Element Analysis Program, Version 8.3 User Manual, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley, CA, USA, 2011.

FLETCHER, C. A. J.; **Computational Techniques for Fluid Dynamics,** v. 1, Springer-Verlag, Berlin, 1991.

GNANASAMBANDAM, N.; PRIMAVERA, A.; SRIHARI, K.; N., **The reliability prediction of electronic packages - an expert systems approach,** International Journal of Advanced Manufacturing Technology 27:3-4 (2005) 381-391

GONG, G.; CHEN, F.; SU, H.; ZHOU, J.; **Thermodynamic simulation of condensation heat recovery characteristics of a single stage centrifugal chiller in a hotel,** Applied Energy, 91 (2012) 326-33, 2012.

GUIHUA, H.; HONGGANG, W.; FENG, Q. **Numerical simulation on flow, combustion and heat transfer of ethylene cracking furnaces.** Chemical Engineering Science, 66 (2011) 1600-1611, 2011.

GUO, X.; DAI, R. **Numerical simulation of flow and heat transfer in a random packed bed.** Particuology, 8 (2010) 293-299, 2010.

GUTIÉRREZ ORTIZ, F. J., **Modeling of fire-tube boilers,** Applied Thermal Engineering, v31(16) 3463-3478, 2011.

HALL, A. D.; **A Methodology for Systems Engineering.** [S.l.]: Van Nostrand Reinhold, 1962.

HONOUR, E.; **INCOSE: History of the International Council on Systems Engineering,** The Journal of the International Council on Systems Engineering, 1 (1998) 4-13, 1998.

HORST, T. A.; ROTTENGRUBER, H.; SEIFERT, M.; RINGLER, J.; **Dynamic heat exchanger model for performance prediction and control system design of automotive waste heat recovery systems,** Applied Energy, 105 (2013) 293-303, 2013.

JORGE, L. M. M.; RIGHETTO, A. R.; POLLI, P. A.; SANTOS, O. A. A.; MACIEL FILHO, R. **Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system.** Journal of Food Engineering, 99 (2010) 351-359, 2010.

KAISER, K. L., **Electromagnetic compatibility handbook,** CRC Press, 2004.

KANERVA, S.; HANSEN, J. F.; **State of the art in electric propulsion - viewpoint on redundancy,** IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 499-504, Baltimore, Maryland, USA; 2009.

KARAMANGIL, M. I.; COSKUN, S.; KAYNAKLI, O.; YAMANKARADENIZ, N. **A simulation study of performance evaluation of single-stage absorption refrigeration system using conventional working fluids and alternatives.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010) 1969-1978, 2010.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L.; **Compact heat exchangers.** 3<sup>rd</sup> Ed New York: McGraw-Hill; 1984.

KE, Y.; PEI-QI, G.; YAN-CAI, S.; HAI-TAO, M. **Numerical simulation on heat transfer characteristic of conical spiral tube bundle.** Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 284-292, 2011.

KIM, J. H.; SIMON, T. W.; VISKANTA, R. **Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results [editorial],** Journal of Heat Transfer 115 (1993) 5-6, 1993.

KINCAID, D.; CHENNEY, W. **Numerical analysis.** Wadsworth, Belmont, CA, 1994.

KIZILTAS, S.; ERDOGDU, F.; KORAY PALAZOGLU, T. **Simulation of heat transfer for solid-liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions.** Journal of Food Engineering, 97 (2010) 449-456, 2010.

KOTENKO, O.; MOSER, H.; RIEBERER, R. **Thermodynamic simulation of alternative absorption heat pumping processes using natural working fluids.**



International Journal of Refrigeration, 35 (2012) 594-604, 2012.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**, 3ª Ed., Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

KUNJAPUR, A.; ELDRIDGE, R. **Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae**. Ind. Eng. Chem. Res., v.49, p. 3516–3526, 2010.

KURANO, N.; IKEMOTO, H.; MIYASHITA, H.; HASEGAWA, T.; HATA, H.; SMIYACHI, S., **Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis**. Energy Convers. Mgmt., v. 36, n. 6-9, p. 689-692, 1995.

KURANO, N.; MIYACHI, S. **Selection of Microalgal Growth Model for Describing Specific Growth Rate-Light Response Using Extended Information Criterion**. Journal of Bioscience and Bioengineering, 100 (2005) 403-408, 2005.

LAGUERRE, O.; BENAMARA, S.; FLICK, D. **Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator**. International Journal of Refrigeration, 33 (2010) 1425-1433, 2010.

LALL, P.; ISLAM, M. N.; RAHIM, M. K., SUHLING, J. C., **Prognostics and health management of electronic packaging**, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 29:3 (2006) 666-677

LEMUS-MONDACA, R. A.; ZAMBRA, C. E.; VEJA-GÁLVEZ, A.; MORAGA, N. O. **Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices**. Journal of Food Engineering, 116 (2013) 109-117, 2013.

LIMA, M. A.; LIGO, M. A. V.; CABRAL, M. R.; BOEIRA, R. C.; PESSOA, M. C. P. Y.; NEVES, M. C. **Emissão de gases de efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil**. EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna, 1999

LIN, S.; BROADBENT, J.; MCGLEN, R. **Numerical study of heat pipe application in heat recovery systems**. Applied Thermal Engineering, 25 (2005) 127-133, 2005.

LIPSCHUTZ, S.; LIPSON, M. L. **Theory and problems of probability**, 2ª Ed. McGraw-Hill, New York, 2000.

LOPES, E. J. **Sequestro de dióxido de carbono em fotobiorreatores**. Tese de doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, 2007.

LOPES, J. M. B.; **Ray tracing**, Departamento de Engenharia Informática, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

LOU, W.; HUANG, M.; ZHANG, M.; LIN, N.; **Experimental and zonal modeling for wind pressures on double-skin facades of a tall building**, Energy and Buildings, 54 (2012) 179-191, 2012.

LOURENÇO, S. O., **Cultivo de Microalgas Marinhas– princípios e aplicações**. 1ª ed. São Carlos: RiMa, 2006.

MAOR, T.; APPELBAUM, J. **Horizontal Tubular Microalgae Photobioreactor Plant View Factors and Diffuse Radiation**. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, 2011a.

MAOR, T.; APPELBAUM, J. **Solar Radiation on Horizontal Tubular Microalgae Photobioreactor: Direct Beam Radiation**. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 133, 2011b.

MARTÍNEZ, I.; CASAS, P. A. **Simple model for CO<sub>2</sub> absorption in a bubbling water column**. Braz J Chemical Eng, Vol. 29, No. 01, pp. 107-111, 2012.

MATA, T.; MARTINS, A.; CAETANO, N. **Microalgae for biodiesel production and other applications: a review**. Renew. Sust. Energ. Rev., v. 14, p. 217–232, 2010.

MAURO, A.; ARPINO, F.; MASSAROTTI, N. **Three-dimensional simulation of heat and mass transport phenomena in planar SOFCs**. International Journal of Hydrogen Energy, 36 (2011) 10288-10301, 2011.

MINKOWYCZ, W. J.; SPARROW, E. M.; SCHNEIDER, G. E.; PLETCHER, R. H. **Handbook of numerical heat transfer**, 2<sup>a</sup> Ed. Wiley, New York, 2006.

MOLINA GRIMA, E.; GARCÍA CAMACHO, F.; SÁNCHEZ PÉREZ, J. A.; FERNÁNDEZ SEVILLA, J.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F.G.; CONTRERAS GÓMEZ, A.A **mathematical model of microalgal growth in light limited chemostat cultures**, Journal Chem. Technol. Biotechnol., vol.61, p.167-173, 1994.

MONDAL, A.; DATTA, A. K.; **Two-dimensional DFC modeling and simulation of crustless bread baking process**. Journal of Food Engineering, 99 (2010) 166-174, 2010.

MORWEISER, M.; KRUSE, O.; HANKAMER, B.; POSTEN, C. **Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production**. Appl. Microbiol. Biotechnol. v. 87, p. 291–1301, 2010.

MULIA-SOTO, J. F.; FLORES-TLACUAHUAC, A. **Modeling, simulation and control of an internally heat integrated pressure-swing distillation process for bioethanol separation**. Computers and Chemical Engineering, 35 (2011) 1532-1546, 2011.

NAM, Y.; OOKA, R. **Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real-scale experiment**. Energy and Buildings, 42 (2010) 69-75, 2010.

NIJEMEISLAND, M.; DIXON, A. G. **CFD study of fluid flow and wall heat transfer in a fixed bed of spheres**. AIChE Journal, 50, 906-921, 2004.

O'ROURKE, J. **Computational geometry in C**, 2<sup>a</sup> Ed., Cambridge University Press, 1998.

OON, C. S.; TOGUN, H.; KAZI, S. N.; BADARUDIN, A.; ZUBIR, M. N. M.; SADEGHINEZHAD, E. **Numerical simulation of heat transfer to separation air flow in an annular pipe**. International Communications in Heat and Mass Transfer,

39 (2012) 1176-1180, 2012.

ORDONEZ, J. C.; VARGAS, J. V. C.; HOVSAPIAN, R. **Modeling and simulation of the thermal and psychrometric transient response of all-electric ships, internal compartments and cabinets.** Simulation; 84(8-9):427-439, 2008.

PAPÁČEK, S.; RÁLEK, P.; HOKR, M.; KOPECKÝ, J.; MASOJÍDEK, J.; STYS, D.; PETERA, K. **Methodology for algal photobioreactor design: mathematical modelling of hydrodynamic mixing and prediction of light regime parameters,** The 2<sup>nd</sup>. International Workshop on Simulation, Modelling, and Simulation, and Numerical Analysis. Liberec (CZ), 2003.

PASQUIER, P.; MARCOTTE, D., **Short-term simulation of ground heat exchanger with an improved TRCM,** Renewable Energy, v46, 92-99, 2012.

PÉREZ, B. E.; PINA, C. I.; RODRIGUEZ, L. P.; **Kinetic model for growth of Phaeodactylum tricornutum in intensive culture photobioreactor.** Biochemical Engineering Journal; 40(2008) 520-525, 2008.

PETRUCCI, R. H.; GEOFFREY HERRING, F.; MADURA, J. D.; BISSONNETTE, C. **General chemistry: principles and modern applications.** 10<sup>a</sup> Ed, Prentice Hall, 2010.

RAKOPOULOS, C. D.; KOSMADAKIS, G. M.; DEMUYNCK, J.; DE PAEPE, M.; VERHELST, S. **A combined experimental and numerical study of thermal processes, performance and nitric oxide emissions in a hydrogen-fueled spark-ignition engine.** International Journal of Hydrogen Energy, 36 (2011) 5163-5180, 2011.

RICHMOND, A. **Mass culture of cyanobacterium,** MAN, N.H. & CARR, N.G. (eds). Photosynthetic Prokaryotes. Plenum Press, New York, 1992.

ROMERO, R. J.; ROGRÍGUES-MARTÍNEZ, A.; **Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer,** Desalination, 220 (2008) 506-513, 2008.

RORRER, G.; CHENEY, D. **Bioprocess engineering of cell and tissue cultures for marine seaweeds.** Aquacultural Engineering, v. 32, p. 11-41, 2004.

RUBIO, F. C.; GARCIA, J. L.; MOLINA-GRIMA, E.; CHISTI, Y. **Steady-state axial profiles of dissolved oxygen in tall bubble column bioreactors for algal culture.** Chemical Engineering Science, v. 54, p. 1711-1723, 1999.

RYU, H. J.; OH, K. K. **Optimization of the influential factors for the improvement of CO<sub>2</sub> utilization efficiency and CO<sub>2</sub> mass transfer rate.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 15, p. 471-475, 2009.

SADHUKHAN, J.; ZHAO, Y.; SHAH, N.; BRANDON, N. P. Performance analysis of integrated biomass gasification fuel cell (BGFC) and biomass gasification combined cycle (BGCC) systems. Chemical Engineering Science, 65 (2010) 1942-1954, 2010.

SAGE, A. P.; **Systems Engineering**. [S.l.]: Wiley IEEE, 1992.

SÁNCHEZ, J. F.; SERVILLA, J. M. F.; ACIÉN, F. G.; CERON, M. C.; PARRA, J. P.; GRIMA, E. M. **Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: influence of irradiance, dilution rate and temperature**, Applied Microbiol. Biotechnol., v. 79, p. 719–729, 2008.

SARLAH, A.; POREDOS, A.; **Dimensionless numerical model for simulation of active magnetic regenerator refrigerator**, International Journal of Refrigeration, 33 (2010) 1061-1067, 2010.

SATYANARAYANA, K. G.; MARIANO, A. B.; VARGAS, J. V. C., **A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials**, International Journal of Energy Research, 35:191-311, 2011.

SERENOTTI, F.; CRESPI, B. A.; TORRES, L. G. **Contribuição à modelagem da produção de *Spirulina maxima* em fotobioreatores**. Revista Univ. Rural, vol.23, p.8–17, 2004.

SHAPIRO, B.; **Creating compact models of complex electronic systems: an overview and suggested use of existing model reduction and experimental system identification tools**, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol 26, no. 1, março 2003.

SIROVICH, L., **Turbulences and the dynamics of coherent structures, Parts I & II**, Quart. Appl. Math, 45 (1987) 561-571, 1987.

SIVILL, L.; AHTILA, P.; TAIMISTO, M. **Thermodynamic simulation of dryer section heat recovery in paper machines**. Applied Thermal Engineering, 25 (2005) 1273-1292, 2005.

SMITH, A. N.; ELLIS, R. L.; BERNARDES, J. S.; ZIELINSKI, A. E.; **Thermal management and resistive rail heating of a large-scale naval electromagnetic launcher**. IEEE Transactions on Magnetics, 41(1):235-40, 2005.

SOMAN, R. R.; DAVIDSON, E. M.; MCARTHUR, S. D. J.; **Using functional failure mode and effects analysis to design the monitoring and diagnostics architecture for the zonal MVDC shipboard power system**, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 123-128, Baltimore, Maryland, USA; 2009.

SONG, Z.; MURRAY, B. T.; SAMMAKIA, B., **A compact thermal model for data center analysis using the zonal method**, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology, 64:5, 361-377, 2013

SOUZA, J. A.; O'LARY, F. M.; HOVSAPIAN, R.; ORDONEZ, J. C.; VARGAS, J. V. C.; CHALFANT, J., **Visualization tool for notional all-electric ships data bases**, Proceedings of the 2010 Grand Challenges in Modeling and Simulation, Ottawa, Canada. GCMS Proceedings, July 11 – 14, 2010

STALL, A., **Desenvolvimento de fotobiorreatores compactos de cultivo de microalgas para a produção de biodiesel**, Dissertação de Mestrado, Universidade

Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

STEELE, J. H. **Microbial kinetics and dynamics in chemical reactor theory**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, p.405-483, 1977.

STEINBOECK, A.; WILD, D.; KIEFER, T.; KUGI, A. **A fast simulation method for 1D heat conduction**. Mathematics and Computers in Simulation, 82 (2011) 392-403, 2011.

SU, H.; LI, Y. **Theoretical simulation of vacuum cooling of spherical foods**, Applied Thermal Engineering, 23 (2003) 1489-1501, 2003.

SUBRAMANIAN, G.; THAJUDDIN, N. **Cyanobacterial biodiversity and potential applications in biotechnology**, Current Science, vol.89, no.1, p.47-57, 2005.

SUGAI, M. H. **Modelagem matemática de coluna de gaseificação de fotobiorreatores tubulares para cultivo de microalgas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Paraná, 2012.

SUNDAY, D. **Intersections of rays, segments, planes and triangles in 3D**, 2001 <www.softsurfer.com>. Acesso em: 11/2011.

SUNSHUAIHUI; ZHAOYUANYANG; LILIANSHENG; SHUPENGCHENG; **Simulation research on scroll refrigeration compressor with external cooling**, International Journal of Refrigeration, 33 (2010) 897-906, 2010.

SWINBANK, W. C. **Long-wave radiation from clear skies**. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society 89, pp. 339-348, 1963.

TAMASAUKAS, J.; POIRIER, M.; ZMEUREANU, R.; SUNYÉ, R.; **Modeling and optimization of a solar assisted heat pump using ice slurry as a latent storage material**, 86 (2012) 3316-3325, 2012.

TAMIYA, H.; HASE, E.; SHIBATA, K.; MITUYA, A.; IWAMURA, T.; NIHEI, T.; SASA, T. **Kinetics of growth of Chlorella, with special reference to its dependence on quality of available light and on temperature**, BURLEW, J. S. (Ed.). Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant. Carnegie Institution of Washington. Washington, DC, p. 204-232, 1953

TAN, K. M.; OOI, K. T.; **Heat transfer in compression chamber of a revolving vane compressor**, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 1519-1528, 2011.

TERREOS, I.; IORDANOFF, I.; CHARLES, J. L. **Simulation of continuum heat conduction using DEM domains**. Computational Materials Science, 69 (2013) 46-52, 2013.

TRIVELATO, G. C.; **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**, Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, Brasil, 2003.

TSO, C. Y.; CHAO, C. Y. H.; FU, S. C.; **Performance analysis of a waste heat driven activated carbon based composite adsorbent – water adsorption chiller**

**using simulation model**, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55 (2012) 7596-7610, 2012.

TSUZUKI, N.; KATO, Y.; ISHIDUKA, T. **High performance printed circuit heat exchanger**. Applied Thermal Engineering, 27 (2007) 1702-1707, 2007.

VAN OORSHOT, J. L. P. **Conversion of light energy in algal cultures**. Med van Lund. Wang., v. 55, p. 225-277, 1955.

VARGAS, J. V. C.; **Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável a partir do biodiesel e outras fontes**. Projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) do edital 039/2007, UFPR, 2007.

VARGAS, J. V. C.; SOUZA, J. A.; HOVSAPIAN, R.; ORDONEZ, J. C.; CHIOCCHIO, T.; CHALFANT, J.; CHRYSOSTOMIDIS, C. **ESRDC ship notional baseline medium voltage direct current (MVDC) architecture thermal simulation and visualization**. Proceedings of the 2011 Grand Challenges in Modeling and Simulation, The Hague, Netherlands. 2011 GCMS Proceedings, June 27-30., 2011.

VARGAS, J. V. C.; SOUZA, J. A.; HOVSAPIAN, R.; ORDONEZ, J. C.; CHIOCCHIO, T.; CHALFANT, J.; CHRYSOSTOMIDIS, C.; DILAY, E. **Notional all-electric ship systems integration thermal simulation and visualization**. Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, accepted, 2012.

VARGAS, J. V. C.; STANESCU, G.; FLOREA, R.; CAMPOS, M. C. **A numerical model to predict the thermal and psychrometric response of electronic packages**. ASME Journal of Electronic Packaging 123(3), 200-210, 2001.

VISIT 1.11.1 Manual, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, 2008.

WAGNER, B., **All-electric ship could begin to take shape by 2012**. NDIA's Business and Technologies Magazine, November, 2007.

WHILLIER, A. **Design factors influencing solar collectors**. Low temperature engineering applications of solar energy, chap. 3, ASHRAE, New York, 1967.

WOODS, R. L.; LAWRENCE, K. L., **Modeling and Simulation of Dynamic Systems**, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

XIANG, H.; WANG, Y.; ZHU, L.; HAN, X.; SUN, Y.; ZHAO, Z. **3D numerical simulation on heat transfer performance of a cylindrical liquid immersion solar receiver**. Energy Conversion and Management, 64 (2012) 97-105, 2012.

XIAO, J.; TONG, L.; DENG, C.; BÉNARD, P.; CHAHINE, R. **Simulation of heat and mass transfer in activated carbon tank for hydrogen storage**. International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 8106-8116, 2010.

XU, H.; MIAO, X.; WU, Q., **High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters**. Journal of

Biotechnology, v. 126, p. 499–507, 2006

YAN, X.; CHEN, G.; HONG, D.; LIN, S.; TANG, L.; **A novel absorption refrigeration cycle for heat sources with large temperature change**, Applied Thermal Engineering, 52 (2013) 179-186, 2013.

YANG, P.; CHEN, Z. X., **Testing on dynamic behavior of PBGA assembly by considering fixed-modes**, Microelectronics International 28:2 (2011) 23-29, 2011.

YANG, X.; YANG, X.; DING, J.; SHAO, Y.; FAN, H. **Numerical simulation study on the heat transfer characteristics of the tube receiver of the solar thermal power tower**. Applied Energy, 90 (2012) 142-147, 2012.

ZANG, J.; HE, Y.; TAO, W.; **3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles – Part II: simulation results of periodic model and comparison between continuous and noncontinuous helical baffles**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 (2009) 5381-5389, 2009.

ZARRELLA, A.; DE CARLI, MICHELE; **Heat transfer analysis of short helical borehole heat exchangers**, Applied Energy, 102 (2013) 1477-1491, 2013.

ZARRINEHKAFSH, M. T.; SADRAMELI, S. M. **Simulation of fixed bed regenerative heat exchangers for flue gas heat recovery**, Applied Thermal Engineering, 24 (2004) 373-382, 2004,

ZHOU, K.; DOYLE, J. C.; GLOVER, K., **Robust and optimal control**, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.