

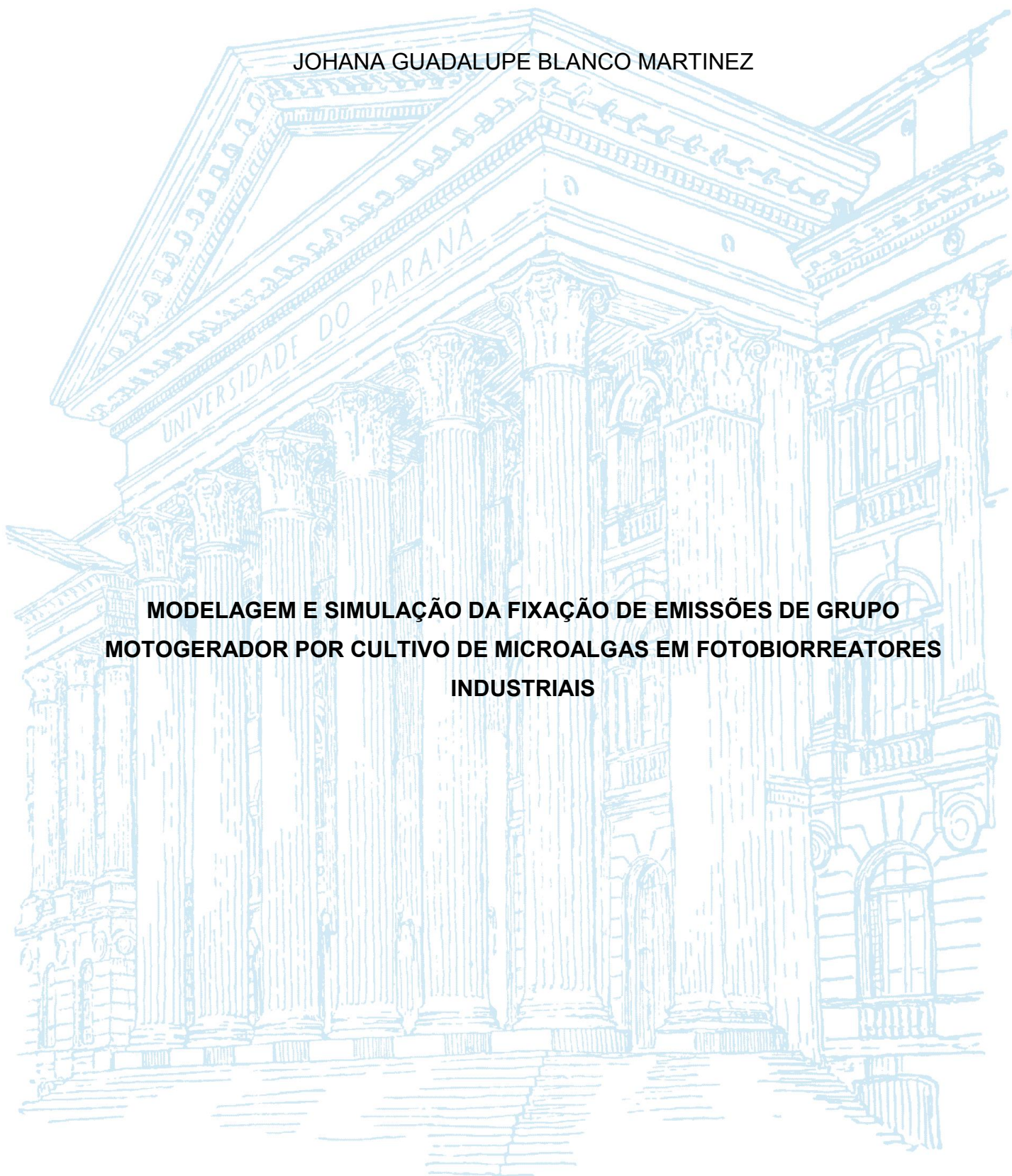
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOHANA GUADALUPE BLANCO MARTINEZ

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FIXAÇÃO DE EMISSÕES DE GRUPO
MOTOGERADOR POR CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES
INDUSTRIAIS**

CURITIBA

2018



JOHANA GUADALUPE BLANCO MARTINEZ

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FIXAÇÃO DE EMISSÕES DE GRUPO
MOTOGERADOR POR CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES
INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas
Coorientador: Dr. Wellington Balmant
Coorientador: Prof. Dr. André Bellin Mariano

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

M385m Martinez, Johana Guadalupe Blanco
Modelagem e simulação da fixação de emissões de grupo motogerador por cultivo de microalgas em fotobiorreatores industriais / Johana Guadalupe Blanco Martinez. – Curitiba, 2018.
79 p. : il. color. ; 30 cm.

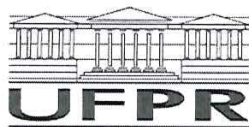
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas.
Coorientadores: Wellington Balmant, André Bellin Mariano.

1. Fixação de emissões. 2. Motogerador. 3. Microalga. 4. Modelagem matemática. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho III. Balmant, Wellington. IV. Mariano, André Bellin. V. Título.

CDD: 620.1

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JOHANA GUADALUPE BLANCO MARTINEZ** intitulada: **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FIXAÇÃO DE EMISSÕES DE GRUPO MOTOGERADOR POR CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES INDUSTRIAIS**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Fevereiro de 2018.

WELLINGTON BALMANT

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

MOISÉS ALVES MARCELINO NETO

Avaliador Externo (UTFPR)

MARCIO AUGUSTO VILLELA PINTO

Avaliador Externo (UFPR)

Dedico a presente dissertação
a minha arca de sabedoria: mãe, pai,
mamita, Suyen, Sama, Maryu, Kenia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus fonte infinita de conhecimento pela sabedoria brindada.

A minha família pelo apoio incondicional em cada meta da minha vida, por acreditar e aceitar minhas decisões. Vocês são o incentivo para fazer o meu melhor.

Ao meu orientador prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas por aceitar guiar-me neste processo de mestrado. Aos meus coorientadores: Dr. Wellington Balmant e prof. Dr. André Bellin Mariano por estarem presentes quando solicitei ajuda. Ao prof. Dr. Carlos Alberto Bavastri minha gratidão por me apoiar e me guiar durante cada processo que precisei realizar.

Ao meu colega e amigo Gustavo Strauch Wilin Finger pela compreensão de língua e disposição de ajuda em todo o trabalho experimental e todos os artigos realizados, rendeu sua ajuda.

Aos meus colegas e amigos de laboratório NPDEAS: Paula Rodriguez, Priscila Paola Dario, Fabiana Lirio, Kemely Branco, Benalle Lemos, Leonardo Martinez, Luis Fernando Rigatti, Matias Muñoz, Diego Araujo, Iago Costa, Beatriz Santos, Dhyogo Taher, pela troca de conhecimentos e compreensão.

A os meus amigos: Ângela Jimenez, Jose Saenz e Carlos Morales pela convivência e companhia neste período longe de casa.

A Organização de Estados Americanos pelo aceite do intercâmbio de estudos de mestrado no Brasil.

“Não contenha o entusiasmo, essa é uma virtude tão valiosa quanto necessária; trabalha, aspira, que desta maneira sempre tende à altura.”

Oswald Neale

RESUMO

Nesta dissertação é apresentada a aplicação do modelo matemático para a simulação e ajuste do processo de fixação de gases de combustão de um motogerador, em uma coluna de fixação de emissões com o meio de cultivo de microalgas. Os gases de combustão foram resfriados antes de ser enviados à coluna de fixação. A coluna de fixação de emissões está construída com 9 m de altura e 0,384 m de diâmetro e com divisões internas para aproveitar a maior transferência de massa entre os gases e o cultivo de microalgas. A espécie de microalga utilizada foi a *Acutodesmus obliquus*, cultivada em um fotobiorreator compacto formado de tubos transparentes com 2,6 m³ de volume. A modelagem matemática para este sistema adotou o Método de Elemento de Volume (MEV), o qual foi aplicado no processo de transferência de calor para resfriar a temperatura dos gases de combustão assim como na transferência de massa da dissolução de CO₂, NO₂, SO₂, e captura biológica celular pelas microalgas. As leis físicas utilizadas foram baseadas na lei de conservação de energia e da massa. A modelagem foi dividida em quatro Volume de Controle (VC) e posteriormente estes VC foram subdivididos em Elementos de Volume (EV). Como resultado, apresenta-se a modelagem e a validação numérica de um sistema de engenharia capaz de fixar gases de combustão e aumentar a produção de biomassa de microalgas, resfriando os gases de combustão à temperatura ambiente e usando uma vazão de 35000 L.h⁻¹ em um período de 11 dias. Portanto, conclui-se que é possível realizar modelos que visem a melhoria de processos de captura de gases, parametrizando e ajustando com os dados experimentais. A dissolução das emissões no meio de cultivo transformadas biologicamente pelas microalgas podem diminuir a poluição no ambiente.

Palavras-chave: Fixação de emissões. Motogerador. Microalga. Modelagem matemática.

ABSTRACT

This presents a mathematical model application for a simulation and adjustment of the process of fixation of flue gases of a genset, in a column purification of emissions with microalgae culture medium. The flue gases were cooled before being sent to the purification column. An emission fixation column is constructed with 9 m of height and 0,384 m in diameter with internal divisions to increase the mass transfer between the gases and the culture of microalgae. The species of microalga employed in this systems the was *Acutodesmus obliquus*, cultivated in a compact photobioreactor composed by transparent tubes with 2,6 m³ of volume. The mathematical methodology for this system adopted Volume Element Method (MEV) which was applied in the process of heat transfer to reduce the temperature of the flue gases as the mass transfer of the dissolution of CO₂, NO₂, SO₂, and cellular biological capture by microalgae. The physical laws used were based on the law of conservation of energy and mass. The modeling was divided in four Control Volumes (CV) and more these VC were subdivided into Volume Elements (VE). As a result of both the modeling and the validation, a system capable of fixing combustion gases and microalgae biomass production, cooling combustion gases at room temperature and using a flow rate of 35000 L.h⁻¹ in a period of 11 days. Therefore it is concluded that is possible to realize models that aim at an improvement of gas capture processes, parameterizing and adjusting the experimental data. The dissolution of the emissions into the culture medium biologically transformed by microalgae, reduce the pollution in the environment.

Keywords: Emission fixation. Genset. Microalga. Mathematical model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MÉTODOS DE CAPTURA DE GÁS DE COMBUSTÃO	22
FIGURA 2 – CURVA DE CRESCIMENTO MICROBIAL	26
FIGURA 3 – PROCESSO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS	29
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO NPDEAS.....	35
FIGURA 5 – SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE EMISSÕES COM O CULTIVO DE MICROALGAS	36
FIGURA 6 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO TROCADOR DE CALOR	37
FIGURA 7 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA ENTRE OS GASES DE COMBUSTÃO E O CULTIVO DE MICROALGAS NA COLUNA DE FIXAÇÃO	41
FIGURA 8 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO FBR	46
FIGURA 9 – MICROALGA <i>Acutodesmus obliquus</i> PRODUZIDA NO NPDEAS (aumento de 400X).....	50
FIGURA 10 – FOTOBIOREATOR COMPACTO.....	51
FIGURA 11 – TROCADOR DE CALOR	51
FIGURA 12– COLUNA DE FIXAÇÃO	52
FIGURA 13–TEMPERATURA DO GÁS E DA ÁGUA SAINDO DO TROCADOR DE CALOR.....	56
FIGURA 14 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO GÁS E DA ÁGUA EM EV	57
FIGURA 15 – SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO NA COLUNA DE FIXAÇÃO.	60
FIGURA 16 – CRESCIMENTO DAS MICROALGAS NO PERÍODO DO CULTIVO..	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EFEITO DOS GASES DE COMBUSTÃO NA SAÚDE HUMANA.....	21
TABELA 2 – MODELAGEM MATEMÁTICA DE CAPTURA DE GASES DE COMBUSTÃO POR CULTIVO DE MICROALGAS	32
TABELA 3 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DO TROCADOR DE CALOR.....	40
TABELA 4 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DA COLUNA DE FIXAÇÃO	45
TABELA 5 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DO FBR.....	49
TABELA 6 – DADOS TÉCNICOS DOS SENSORES DE TESTO350	53
TABELA 7 – PARAMETRIZAÇÃO DO CAUDAL DE GASES COLOCADOS NA COLUNA DE FIXAÇÃO COM MICROALGAS	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Constante empírica para taxa de crescimento dependente da temperatura
A	Área da secção transversal de troca de calor entre o VC1 e VC2
A ₁	Área do VC1
A ₂	Área do VC2
b	Constante empírica para taxa de crescimento dependente da temperatura
B _f	Limite de polarização da quantidade
c	Constante empírica para taxa de crescimento dependente da temperatura
C	Acúmulo de massa no EV
C ₂ H ₆	Etano
cells	Células
CFCs	Clorofluorcarbonetos
CH ₄	Metano
CHONS	Composição da biomassa
CO	Oxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
C _p	Calor específico a pressão constante
C _p	Calor específico a pressão constante
C _v	Calor específico a volume constante
C _v	Calor específico a volume constante
d	Diâmetro
D _h	Diâmetro hidráulico
E	Energia total
EDOs	Equações Diferenciais Ordinárias
EV	Elemento de volume
FBR	Fotobiorreator
g	Gramas
GNV	Gás natural veicular
h	Hora
H	Constante de Henry
H ⁺	Hydron
H ₂	Di-hidrogênio

H ₂ O	Água
h _c	Coeficiente de convecção de transferência de calor
HC	Hidrocarbonetos
HCO ₃ ⁻	Íon bicarbonato
ht	Entalpia
I ₀	Intensidade luminosa
K	Kelvin (Unidade de medição)
K ₁	Constante de reação direta
K ₂	Constante de reação inversa
K _c	Condutividade térmica
K _i	Constante de inibição
K _{la}	Coeficiente de transferência de Massa
K _s	Constante de saturação
l	Longitude do trocador de calor
L	Litro
m	Metros
ṁ	Fluxo de massa
MDF	Método de Diferença Finita
MEF	Método de Elementos Finitos
MEV	Modelo de elemento de volume
min	Minutos
mL	Mililitro
MP	Material Particulado
ms	Massa
MVF	Método de Volume Finito
N	Número de mols do elemento
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO ₃ ⁻	Nitrato
N _{tot}	Todas as composições derivadas do Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
p	Pressão
P _f	Limite de precisão

ppm	Partes por milhão
Pr	Número de Prandtl
Q	Caudal
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
r	Raio
R	Constante universal dos gases
Re	Número de Reynolds
Rs	Resistência
s	Segundos
S	Solubilidade do gás
SO ₂	Dióxido de enxofre
SO ₃ ⁻	Sulfito
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SO _x	Óxido de enxofre
S _{tot}	Todas as composições derivadas do enxofre
t	Tempo
T	Temperatura
Tr	Transferência de massa
u	Energia interna específica
U	Energia interna
U _f	Incerteza das medições
U _g	Coeficiente de transferência de calor
V	Volume
VC	Volume de Controle
VC1	Volume de controle 1 (casco exterior do trocador de calor)
VC2	Volume de controle 2 (tubo interior do trocador de calor)
VC3	Volume de controle 3 (coluna de purificação)
VC4	Volume de controle 4 (fotobiorreator)
V _{el}	Velocidade
\dot{W}	Taxa de trabalho
X	Biomassa da Microalga
Y	Coeficiente de rendimento

Subscrito

ág	Propriedade referente ao Água
e	Entradas ao elemento de volume
s	Saídas ao elemento de volume
g	Geração de massa
gás	Propriedade referente ao gás
c	Consumo de massa
j	Divisão do trocador de calor em elementos de volume
i	Divisão da coluna de fixação em elementos de volume
n	Divisão do fotobiorreator em elementos de volume
aq	Estado aquoso
min	Mínimo
max	Máximo
tot	Total
2,5	MP 2,5 μm de diâmetro
10	MP 10 μm de diâmetro
1	Propriedade referente ao VC1
2	Propriedade referente ao CV2
3	Propriedade referente ao CV3
4	Propriedade referente ao CV4
med	Media

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
T_{∞}	Temperatura ambiente
[.]	Concentração molar do componente

Letras Gregas

ν	Viscosidade
Δ	Variabilidade
μ	Taxa de crescimento específico das microalgas

LISTA DE SIGLAS

BP	British Petroleum
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
NPDEAS	Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energias Autossustentáveis
UFPR	Universidade Federal do Paraná
WHO	World Health Organization – Organização Mundial da Saúde
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel intergovernamental de Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.2	EMISSÕES DE COMBUSTÃO E OS EFEITOS NO MEIO AMBIENTE	20
2.3	MÉTODOS PARA TRATAR EMISSÕES DE COMBUSTÃO	22
2.4	MICROALGAS.....	24
2.4.1	Dióxido de carbono como nutriente para microalga.....	24
2.4.2	Dióxido de nitrogênio como nutriente para microalga.....	25
2.4.3	Dióxido de enxofre como nutriente para microalga.....	25
2.4.4	Regime de produção de microalgas	25
2.5	CAPTURA DE GASES DE COMBUSTÃO ATRAVÉS DE CULTIVOS DE MICROALGAS.....	27
2.6	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	27
2.6.1	Modelo de Elemento de Volume.....	28
2.6.2	Modelos matemáticos sobre fixação de gases de combustão em meio de cultivo de microalga	29
2.7	DESAFIOS	33
2.8	OBJETIVOS	33
2.8.1	Objetivo Geral.....	33
2.8.2	Objetivos Específicos	33
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1	MODELO MATEMÁTICO	36
3.1.1	Modelagem matemática do resfriamento dos gases da combustão	37
3.1.2	Balço de massa para a reação dos componentes no VC3 (coluna de fixação).....	41
3.1.3	Modelo matemático do FBR	45
3.2	MÉTODO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE PARAMÉTRICA DO MODELO.....	49
3.3	PROCESSO EXPERIMENTAL DO SISTEMA.....	50
3.4	ANÁLISE DE INCERTEZA	54
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	55

4.1	SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO: AJUSTE E PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA	55
4.1.1	Temperatura de gases de combustão no cultivo de microalgas.....	55
4.1.2	Parametrização do sistema de fixação de gases	58
4.1.3	Transferência de massa dos gases de combustão e o cultivo de microalgas.	59
4.2	CRESCIMENTO DA BIOMASSA DAS MICROALGAS	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1	CONCLUSÕES.....	61
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63
	GLOSSÁRIO.....	74
	APÊNDICE A–TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR EM CURITIBA NO PERÍODO DO EXPERIMENTO.....	75
	APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO ANALISADOR TESTO 350	76
	ANEXO A–MEDIÇÃO DE O₂, CO E NO (PROVENIENTES DE GASES DE EXAUSTÃO) NA ENTRADA E SAÍDA DA COLUNA DE FIXAÇÃO	78
	ANEXO B–PH DO CULTIVO	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

As emissões poluentes no meio ambiente estão aumentando continuamente devido ao crescente uso da energia, utilizando combustíveis fósseis como solução mais rápida. Estas emissões provenientes das indústrias de geração de energia elétrica, através da combustão, acumulam-se no ambiente tornando-se poluentes. As emissões são apontadas como responsáveis pelo aquecimento global, mudança climática, fenômenos naturais frequentes e provocam efeitos adversos na saúde do ser humano (PIRES et al., 2012).

As microalgas têm a capacidade para diminuir as concentrações destes gases poluentes no ambiente. Elas precisam de um meio de cultivo com nutrientes como CO₂, NO_x, SO_x entre outros que são necessários para o crescimento, além de parâmetros regulados como a temperatura e luz. Todo este meio é chamado autotrófico pelas condições a que estão expostas a microalgas (HAMED, 2016).

A exposição das emissões em fase gasosa através da transferência de massa com a fase líquido do cultivo de microalga permite a dissolução no meio aquoso. Os componentes desta emissão são processados pelo metabolismo das microalgas, transformando-os em outras substâncias de valor comercial (KROUMOV et al., 2016).

Para otimizar a quantidade de captura destes gases pelo metabolismo das microalgas, implementam-se modelos matemáticos validados experimentalmente. Estes modelos são baseados na Engenharia de Sistemas como ferramenta para uso nos processos (BALDWIN; SAUSER, 2009). O modelo matemático utilizado neste trabalho é o Método de Elementos de Volume (MEV) (VARGAS; ARAKI, 2017) o qual aplica as leis físicas seguindo o processo de Engenharia de Sistemas.

Estudos de modelagem matemática e ajustes sobre a captura das emissões provenientes de queima de combustível fóssil pelas microalgas. As avaliações nos diferentes métodos estudam parâmetros baseados na transferência de massa, fenômeno de transporte, fenômenos termodinâmicos, fenômenos biológicos, principalmente estudando o efeito do CO₂. As validações são feitas para diferentes tipos de espécies de microalgas em diferentes condições de cultivos (KROUMOV et al., op cit.).

Todos estes estudos experimentais e modelos matemáticos são normalmente realizados em escala laboratorial, não tendo o conjunto de estudo para escala industrial. Portanto, devido à falta de modelos matemáticos de um sistema em estudos escalonados, este trabalho propõem um desenvolvimento de um modelo matemático para o processo de fixação de gases validando- o com dados do experimentais. O modelo analisa o resfriamento da temperatura ideal dos gases para que as microalgas capturem CO_2 , NO_2 e SO_2 numa escala industrial e o comportamento do crescimento da biomassa de forma ótima com o consumo destes nutrientes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este documento está organizado nos capítulos seguintes:

O capítulo 1 apresenta a contextualização dos conceitos aplicados neste estudo e a motivação fundamental dos conceitos.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica a qual aborda temas sobre os gases de combustão, emitidos por queima de combustíveis fosseis e o seu tratamento para captura por meio das microalgas. Além disso, inclui a utilização das microalgas como fonte de energia renovável através dos biocombustíveis. Também traz uma revisão sobre a análise matemática para a otimização do processo de captura de gases com microalgas. Ao final, os desafios, o objetivo geral e os objetivos específicos para atingir neste estudo são apontados.

O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos empregados para abordar a modelagem e o a realização experimental em escala de Engenharia para ajuste do modelo.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos do experimento realizado e os resultados da modelagem para um conjunto de dados do trabalho com base no estudo feito. O capítulo 5 traz as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia elétrica a nível mundial nos últimos 10 anos cresceu em média 1,8 % segundo a British Petroleum (BP) (2017). Desta, 85,52 % do consumo foi gerado a partir de combustíveis fósseis: óleo, gás natural e carvão. No Brasil 56,54 % do consumo de energia elétrica no ano 2016 foi gerada a partir de fontes derivadas dos combustíveis fósseis (MME, 2017).

Uma das formas mais usadas para gerar esta energia é através dos motores de combustão interna (WEI; GENG, 2016), onde os combustíveis fósseis são usados como energia química que por meio da combustão é transformada em trabalho, calor perdido e gases de escapes (HEYWOOD, 1998). Estes gases de escapes provenientes desta combustão contém uma grande variedade de componentes (YEN et al., 2015), entre eles estão o vapor de água, H_2O , CO , CO_2 , O_2 , H_2 , N_2 , NO , NO_2 , HC , MP , SO_x como dióxido e trióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis: CH_4 , C_2H_6 , CFCs, além de material particulado $MP_{2,5}$ e MP_{10} . As concentrações destes gases de combustão variam de acordo com o equilíbrio químico do combustível e da temperatura de queima (ABDELAAL; HEGAB, 2012). O acúmulo destas emissões antropogênicas afeta ao ambiente e aos seres vivos apresentando efeitos negativos que são abordados a seguir.

2.2 EMISSÕES DE COMBUSTÃO E OS EFEITOS NO MEIO AMBIENTE

Os gases de combustão no ambiente são responsáveis pelo efeito estufa que causam aquecimento global, mudança climática, chuva ácida, danos na saúde das pessoas, danos à flora e fauna de forma direta ou indiretamente (PIRES et al., 2012).

O aquecimento global tem sido objeto de estudo de muitos cientistas e vários cenários de aquecimento têm sido modelados (MING et al., 2014). Comparando com a realidade, este aumento da temperatura na superfície da terra está sendo muito rápido. Segundo o Pachauri, cientista do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês “Intergovernmental Panel on Climate Change”) (2014) no período do ano 1880 até 2012 a média da temperatura aumentou $0,85\text{ }^{\circ}C$, sendo o

CO₂ uma das fontes principais dos gases de efeito estufa causando retenção de calor de radiação na camada de ozônio (EPA 2017).

Além do efeito estufa, as emissões causam chuva ácida a qual é formada pela mistura da chuva com emissões poluentes, gases como CO₂, enxofre, nitrogênio e material particulado que são dissolvidos na água, e formam um pH muito baixo convertendo em uma solução ácida. Logo, esta chuva é precipitada sob a terra, causando efeitos negativos ao ser humano e todos os ecossistemas em geral (BURNS et al., 2016). Uma pesquisa realizada perto das usinas termoelétricas de combustíveis fósseis a carvão na Índia no período de monção, encontraram amostras da água de chuva com um pH baixo e com elevadas quantidades de óxidos de enxofre (SINGH et al., 2016).

O efeito direto destas poluições na saúde humana causa mortalidade e morbidade quando em contato por convecção e/ou condução através da chuva, vento, solo, corpos de água. Uma relação de causa efeito dos poluentes ao ser humano está mostrada na Tabela 1.

TABELA 1 – EFEITO DOS GASES DE COMBUSTÃO NA SAÚDE HUMANA

Poluente	Impacto	Efeito na saúde humana
Partículas de SO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , PM _{2,5}	Mortalidade	Internações cerebrovasculares, Insuficiência cardíaca congestiva, Bronquite crônica, Tosse crônica em crianças.
SO ₂	Morbidade: doenças cardiopulmonares	Sintomas respiratórios inferiores, Tosse em asmáticos
	Mortalidade	Hospitalização, Consulta de médico.
O ₃ , NO _x , Composto orgânico volátil (VOC)	Morbidade: doenças cardiopulmonares	Asma, Licença por doença, Atividade restrita.
	Mortalidade	Admissões hospitalares respiratórias. Dias de atividade, Ataques de asma, Dias de sintomas.
CO	Mortalidade	Insuficiência cardíaca congestiva.
	Morbidade	Cardiovascular.
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos, fuligem de diesel, benzeno, 1,3-butadieno, dioxina, As, Cd, Cr-VI, Ni	Mortalidade	Câncer.
	Morbidade	Morbidade neurotóxica

FONTE: EXTERN E¹ (2005 apud MARKANDYA, 2007).

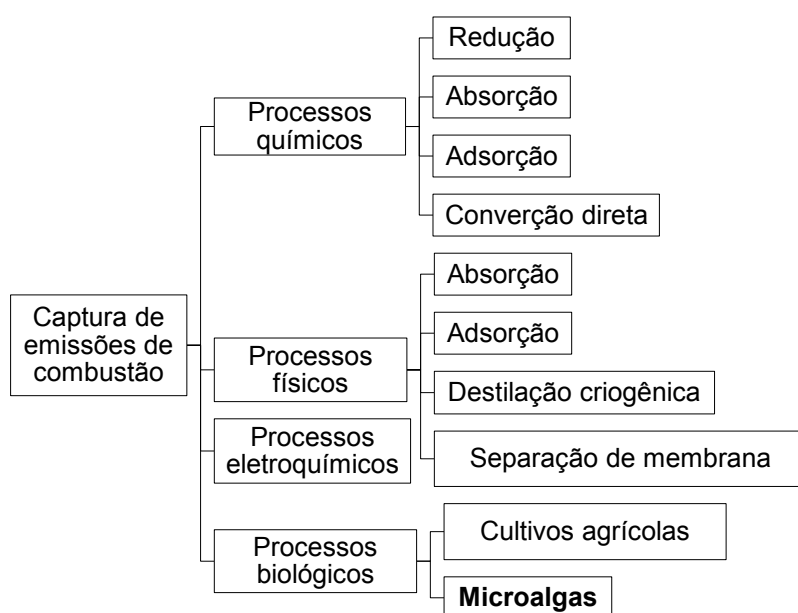
¹European Commission. ExternE: **Externalities of Energy: Methodology 2005 Update**. EUR 21951. Brussels: European Commission, 2005.

Estimativas feitas pela Organização Mundial da Saúde (WHO, do inglês “World Health Organization”) (2016) sobre as doenças ocasionadas por poluições do ar ambiental, baseada em método de nível de exposição, estimaram que para o ano 2012 causaram três milhões de mortes a nível mundial. O maior número de mortes por esta foi na Índia e China, com uma estimativa maior ou igual a 150.000. Tais mortes foram ocasionadas por acidente vascular encefálico (36 %), por cardiopatia isquêmica (36 %), câncer de pulmão (14 %), obstrução pulmonar crônica (8 %) e por Infecção respiratória inferior aguda (6 %).

2.3 MÉTODOS PARA TRATAR EMISSÕES DE COMBUSTÃO

Para diminuir os gases de combustão na atmosfera existem legislações (EUROPEAN DIRECTIVE Nº 436, 2010; CONAMA/BRASIL Nº 436, 2011) e acordos internacionais (PROTOCOLO DE QUIOTO, 1998; ACORDO DE PARIS, 2015) que restringem a quantidade de emissão liberada. Para isto são implementados muitos métodos, reduzindo os níveis de contaminação ambiental. As tecnologias utilizadas para captura de emissões de combustão tradicionalmente empregam métodos de recuperação melhorada, captura e armazenagem, e fixação direta. Através de processos químicos, físicos, eletroquímicos e biológicos resumidos na FIGURA 1 e detalhados posteriormente.

FIGURA 1 – MÉTODOS DE CAPTURA DE GÁS DE COMBUSTÃO



FONTE: A autora (2018)

Para a captura destes gases são usadas vários tipos de tecnologia entre elas a captura, utilização e armazenagem de carbono (CCUS, do inglês “Carbon Capture, Utilization, and Storage”). O CCUS engloba os métodos de: recuperação melhorada do óleo diesel (EOR, do inglês “Enhanced Oil Recovery”), o método de recuperação melhorada do combustível gás (EGR, do inglês “Enhanced Gas Recovery”) e o método de melhoramento de combustíveis carvão e metano (ECBM, do inglês “Enhanced Coal Bed Methane”). Os quais são utilizados na matéria prima de produtos químicos, mineralização para fabricação de materiais de construção e para processos fotossintéticos (LAUMB et al., 2013).

A tecnologia de captura de carvão e armazenagem baseia-se na captura pós-combustão através da técnica de absorção, adsorção, destilação criogênica e separação de membrana (HANSAN et al., 2014; BEN-MANSOUR et al., 2016). No processo de absorção os gases são dissolvidos em um solvente físico ou químico, do tipo alcanolaminas, aminoácidos, amônia ou piperazina aquosa. A adsorção é realizada mediante adsorventes químicos realizando reação química na superfície da composição utilizada, sejam óxidos ou sais de metais, hidrotalcites ou sais duplos. A adsorção também é realizada mediante adsorventes físicos através da estrutura eletrônica do átomo ou molécula é perturbado por adsorção (SONGOLZADEH et al., 2014; BEN-MANSOUR et al., op cit.). A destilação criogênica é utilizada a baixas temperaturas para condensar os gases para, então separar e purificar. A separação por membrana realiza filtrações mediante membrana inorgânica de meios porosos ou densos, através de membrana polimérica, membrana de matriz mista ou membrana de fibra oca (SONGOLZADEH et al., op cit.). O processo eletroquímico captura o CO₂ e converte em combustível ou outro químico. A bioeletroquímica utiliza processos microbiais e eletroquímicos convertendo hidrogênio e CO₂ em outros compostos químicos (LAUMB et al., op cit.).

Outra técnica de captura é fixando diretamente os gases, sem precisar de armazenagem, por meio de processos fotossintéticos realizados com cultivos agrícolas em estufa prédesenvolvida para fixar gases poluentes do ambiente para o crescimento de biomassa de vegetal. As plantas utilizadas neste tipo de cultivo são as flores, frutas especiais e vegetais, como forma natural que estes vegetais absorvem CO₂. Outra forma de capturar fotossinteticamente estes gases é por meio

das microalgas, as quais consomem diretamente nutrientes presentes nestes gases, aumentando sua biomassa (JUDD et al., 2015).

2.4 MICROALGAS

As microalgas são consideradas um dos seres vivos mais antigos da Terra, que produzem O₂ através da fotossíntese. Estes microrganismos unicelulares ou coloniais se reproduzem em meios aquáticos ou úmidos e se desenvolvem em aeração (SABER et al., 2016). Elas podem desenvolver-se em diferentes tipos de metabolismos dependente da condição de crescimento: fotoautotrófico, heterotrófico, fotoheterotrófico ou mixotrófico (CUELLAR-BERMUDEZ et. al., 2015).

Para o crescimento autotrófico utiliza-se luz e nutrientes, além de regulação de parâmetros operacionais como temperatura, intensidade da luz, pH, e tolerância das concentrações dos nutrientes variando para cada espécie (GONZÁLEZ-LÓPEZ et al., 2012). Também estas precisam de macronutrientes como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, enxofre, magnésio, silício e ferro; micronutrientes: manganésio, cobre, zinco, molibdênio, vanádio, boro, cobalto, cálcio, sódio, selênio e níquel (KROUMOV et al., 2016). Elas têm fixação de nutrientes e captação de luz mais eficiente do que outros gêneros fotossintéticos (HE et al., 2013).

Para cultivar biomassa de microalga em larga escala são usados fotobiorreatores de tipo aberto (lagoas naturais, lagoas artificiais e *raceway*), fechado (tubular, coluna vertical, placa plana) ou híbrido (HAMED, 2016). Estes cultivos são aproveitados para remediação de contaminantes atmosféricos, esgoto (ZAYADAN, et al., 2017) e emissões de queima de combustíveis (NAPAN et al., 2015). São usados os contaminantes ambientais como matéria prima para nutrientes, reduzindo assim o custo de nutrientes sintéticos.

2.4.1 Dióxido de carbono como nutriente para microalga

Quando os gases de combustão ricos em CO₂ são colocados no cultivo o pH reduz devido à reação com o água, liberando íon hidrogênio (CONCAS et al., 2012). O dióxido de carbono dissolvido na água forma diferentes espécies, entre eles o íon carbonato, íon bicarbonato, carbono inorgânico e outros. Estes compostos carbonatos são fixados como nutriente pela microalga através da fotossíntese por meio do ciclo de Calvin-Benson produzindo proteínas essenciais no crescimento da

célula, lipídeos e carboidratos que podem ser utilizados posteriormente para a conversão desta biomassa em biocombustíveis (KROUMOV et al., op cit.; PAVLIK et al., 2017). Este elemento CO_2 é o componente em maior quantidade que a microalga precisa (VAN DEN HENDE et al., 2012).

2.4.2 Dióxido de nitrogênio como nutriente para microalga

O dióxido de nitrogênio é mais solúvel em água dentro das espécies formada de nitrogênio. O NO_2 reage no cultivo transformando-se em nitrato o qual é consumido pela microalga, aumentando assim sua biomassa (HUANG et al., 2016). Depois do carbono, o nitrogênio é o segundo componente mais importante usado para a produção de biomassa (VAN DEN HENDE et al., op. cit.). Em vários estudos (SAMORÌ et al., 2013; PECCIA et al., 2013; EYNDE, Erik Van et al., 2016) foram realizados experimentos sobre o efeito do consumo de nitrogênio (com fontes de nitrogênio provenientes de água residual e gás de combustão) pela microalga, resultando efeito positivo no crescimento de esta.

2.4.3 Dióxido de enxofre como nutriente para microalga

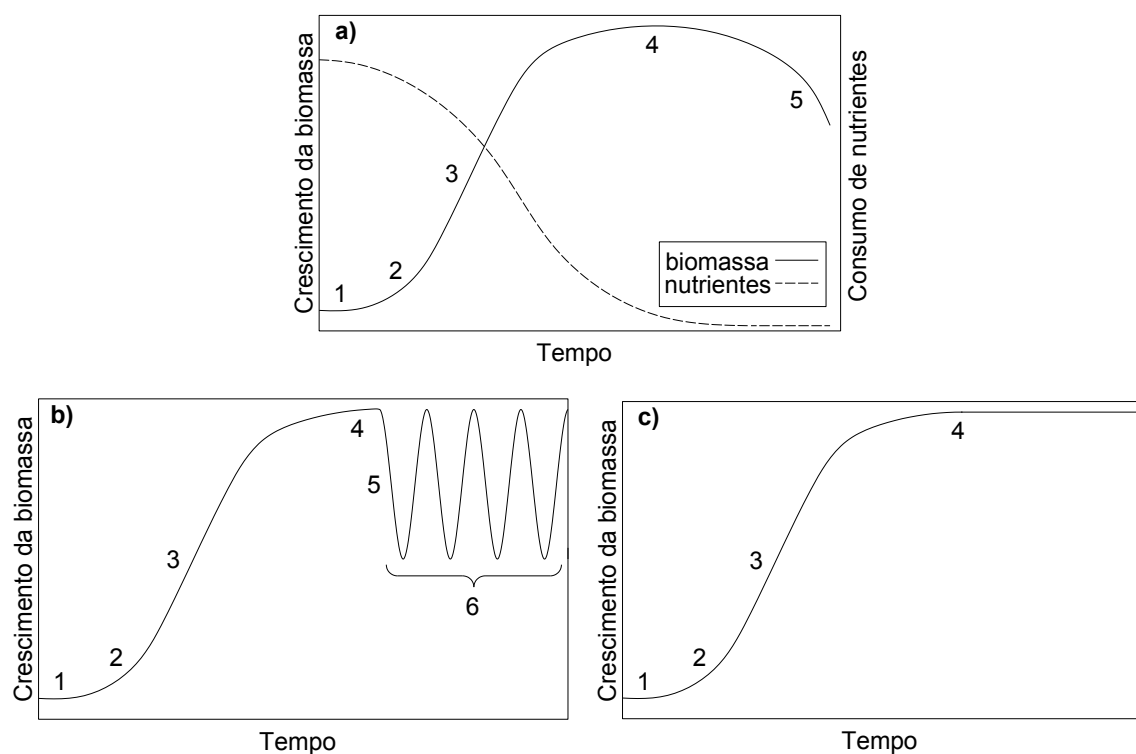
Quando o dióxido de enxofre é dissolvido na água do cultivo, este forma sulfito e é consumido pela microalga para formação de aminoácidos cisteína e metionina, além de estar presente em lipídios de tilacóides (VAN DEN HENDE et al., op. cit.). O enxofre pode inibir o crescimento da microalga dependendo da concentração, do tempo de exposição no cultivo e também da espécie de microalga (RONDA et al., 2014).

2.4.4 Regime de produção de microalgas

A produção de microalgas pode ser realizada em regime de batelada, semicontínuo ou contínuo (HO et al., 2014). Na produção em batelada (FIGURA 2a) o crescimento se desenvolve nas seguintes fases: adaptação ou lag (1), fase logarítmica (log) (2), fase linear(3), fase estacionária (4) e fase de declínio ou morte(5). Neste tipo de produção a biomassa é retirada quando as microalgas consomem os nutrientes (MATA, MARTINS, CAETANO, 2010). O crescimento da biomassa no regime semicontínuo (FIGURA 2b) mantém uma fase oscilatória(6),

aqui as fases 1, 2, 3, 4 e 5 ocorrem em períodos de frequência senoidal. Já no sistema contínuo (FIGURA 2c) ocorre nas fases 1, 2, 3, e 4 mantendo constante a fase estacionária; portanto a biomassa gerada é retirada continuamente ao mesmo tempo em que é feita a reposição de nutrientes (SANTOS, 2016).

FIGURA 2 – CURVA DE CRESCIMENTO MICROBIAL



FONTE: a) MATA, MARTINS, CAETANO (2010); b) e c) adaptado de SANTOS (2016)

LEGENDAS: a) Regime batelada, b) Regime semicontínuo, c) Regime contínuo.

1 – fase lag, 2 – fase exponencial, 3 – fase linear, 4 – fase estacionária, 5 – fase de declínio, 6 – fase oscilatória

A produção de biomassa seca de microalga pode ser utilizada para obtenção de diferentes subprodutos de interesse comercial. Um aproveitamento é na produção de biocombustíveis como biodiesel (YUN et al., 2016; MARTINEZ et al., 2017), bioetanol (HO et al., 2017; RIZZA et al., 2017), biohidrogênio (CORRÊA et al., 2017; SENGMEE et al., 2017) extraídos com uma complexa mistura de componentes orgânicos: ácidos, álcoois, aldeídos, ésteres, cetonas, fenóis, guaiacol e outros (SABER et al., 2016). Esta biomassa é usada na indústria alimentícia humana pelo conteúdo de proteínas, pigmento, corantes, também é usada para suplemento alimentar na aquicultura e ração de animais. Outra aplicação comercial

é na indústria farmacêutica utilizando a astaxantina e ácidos graxos poli-insaturados combatendo doenças como úlceras gástricas, feridas, resfriados, prevenção de aterosclerose, hipercolesterolêmica e tumores, podendo também ser utilizada em cosméticos para cuidados da pele com pigmentos carotenoides por seu conteúdo em vitamina A (PIRES et al., 2017).

2.5 CAPTURA DE GASES DE COMBUSTÃO ATRAVÉS DE CULTIVOS DE MICROALGAS

Muitos trabalhos experimentais sobre captura de gases estão em andamento e a maioria destes são em escala laboratorial e escala piloto (ASLAM et al., 2017; PAVLIK et al., 2017; SADEGHIZADEH et al., 2017; KAO et al., 2014, CORREIA et al., 2017) sendo poucos escalonados a escala industrial (FINGER, 2018). Cada trabalho citado anteriormente realizou experimento com diferentes espécies de microalgas: *Desmodesmus spp.*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sp.* E *Scenedesmus sp.*, as quais obtiveram crescimento da biomassa em condições laboratoriais. Além de testar diferentes modos de colocar gases de combustão, encontrando limites de exposição de gases, tanto em concentração como em tempo. Cada experimento é realizado em diferentes tipos de fotobiorreatores e diferentes condições ou parâmetros. No entanto para otimizar todo este processo é preciso implementar modelos matemáticos.

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

A área de engenharia que estuda a combinação de vários sistemas interconectados é chamada de Engenharia de Sistemas. O sistema de purificação de tratamento de gases de exaustão com microalgas se encaixa nesse tipo de sistema. A otimização desse processo exige a abordagem da Engenharia de Sistemas mediante simulações de modelos (BALDWIN; SAUSER, 2009) que visam satisfazer a realização de objetivos desejados.

Dentro do contexto de Engenharias de Sistemas, a otimização termodinâmica é aplicada nos sistemas que requerem estudos da matéria. Esta otimização atende as grandezas físicas como temperatura, transferência de calor, transferência de massa, umidade relativa entre outras, para reduzir custos e impacto ambiental incrementando a eficiência (DILAY et al., 2015). Os estudos modelados

são realizados mediante a simulação teórica comparando-a com os dados experimentais. A parte teórica se fundamenta em: Método de Elementos Finitos (MEF), Método de Volume Finito (MVF), Método de Diferença Finita (MDF), Modelo de Elemento de Volume (MEV), entre outros (VARGAS& ARAKI, 2017).

A modelagem matemática dos diferentes métodos está baseada na simulação de equações de alta ou baixa ordem. O sistema de equações de alta ordem tem componentes abstrusos e avaliação de muitos parâmetros que por sua complexidade o tempo de simulação pode-se estender à dias ou anos dependendo das avaliações. Estas equações de alta ordem mostram precisão, enquanto que os modelos de baixa ordem podem ser desenvolvidos em menor tempo e ser imprecisos. Um modelo de ordem intermédia tem a capacidade de levar a cabo uma solução próxima a precisão com tempo razoável (SHAPIRO, 2003).

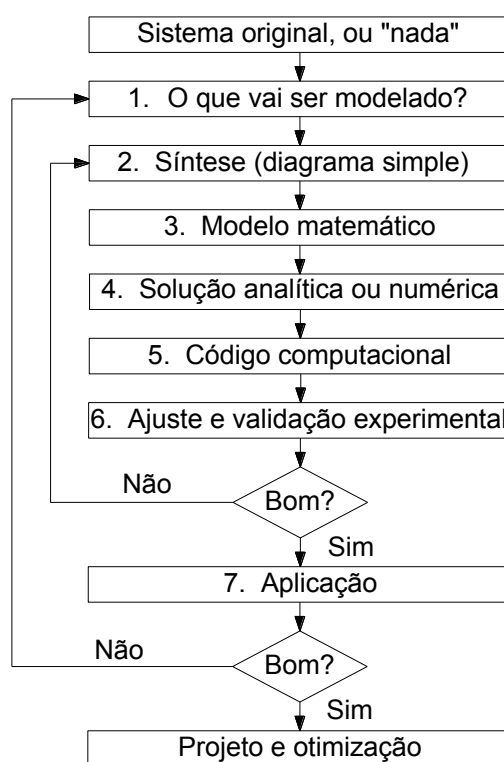
2.6.1 Modelo de Elemento de Volume

O MEV trabalha com sistema tridimensional de ordem reduzida aplicado a sistemas físicos (VARGAS et al., 2001). É validado em estudos de modelagem em sistemas complexos: navio elétrico (YANG et al., 2015), refrigeração (MARTINHO et al., 2016), crescimento de microalga (RIBEIRO et al., 2017), produção de hidrogênio por microalga (CORREIA et al., 2017), análises térmicas em cabos supercondutores DC (SUTTELL et al., 2017), motor de combustão (GRACIANO et al., 2016) e muitos outros Sistemas de Engenharia.

A metodologia da modelagem matemática “MEV” adota a modelagem apresentada no processo de Engenharia de Sistemas da FIGURA 3. Neste processo adotado pelo MEV, primeiro tem-se o sistema que desejamos otimizar no qual se escolhem os parâmetros a serem modelados. Segundo, realiza o esquema do sistema, terceiro, escolhe as hipóteses simplificadoras e elaboram-se as equações diferenciais algébricas, ordinárias ou parciais do modelo matemático com base nas hipóteses escolhidas. Quarto identificando as variáveis desconhecidas e os parâmetros que se tem para encontrar a solução numérica; Quinto, decide o código computacional para simulação das equações. Sexto, realiza os ajustes devidos e valida o método por comparação experimental e no final, o sétimo passo, implementa-se a otimização. Caso a validação não for adequada, repete-se todo o processo (VARGAS, 2013).

A indústria termoelétrica composta por sistemas avançados multicomponente, pode ser avaliada para sua otimização por modelos de Engenharia. Estes modelos analisam os elementos necessários para grandeza física requerida como transferência de calor (WANG et al., 2016), transferência de massa, pressão, temperatura (GRACIANO et al., 2016), potência (CHEN et al., 2016), custos (YAZAWA et al., 2011), entre outros parâmetros para modelar.

FIGURA 3 – PROCESSO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS



FONTE: Vargas (2013).

2.6.2 Modelos matemáticos sobre fixação de gases de combustão em meio de cultivo de microalga

Para otimizar processos sobre o melhor desempenho de captura de gases de combustão no meio de cultivo de microalgas são feitos vários estudos sobre modelagem matemática em diferentes situações. Além disto, é feita a validação com experimentos, a fim de tornar os processos de desenvolvimento mais eficazes na diminuição de emissões dos gases poluentes na atmosfera e no crescimento do cultivo.

He e colaboradores (2013) desenvolveram um modelo matemático, no qual simularam e validaram experimentalmente a dissolução de gases de combustão

(CO₂) no meio de cultivo com relação do crescimento de microalga *Chlorella sp.* Esta foi cultivado em 2 Fotobiorreatores de escala laboratorial de 200 mL, durante 7 dias. Os gases de combustão, provenientes de GNV, foram colocados no modo *on-off* dentro do cultivo. O modo *on* consiste em dar passo ao gás de combustão e no modo *off* em dar passo ao ar atmosférico, trabalhando durante 12 horas para simular o período claro e escuro da fotossíntese. Os gases de combustão foram submetidos a uma vazão de 250 cm³.min⁻¹ previamente filtrados numa solução tampão. Como conclusão obteve que as microalgas podem crescer com exposição ao CO₂ por 10 segundos e 5 - 9 minutos ar do ambiente durante 12 horas.

VALIORGUE et al. (2014) analisou a transferência de massa de CO₂ a biomassa seca de microalga *Neochloris oleoabundans* através de um modelo matemático de dissolução de CO₂ no meio de cultivo para as duas fases e sua medição experimental no período de dezembro a julho. Determinando a relação entre o modelo e as medições de dissolução.

RONDA et al. (2014) avaliaram a modelagem matemática para o crescimento da microalga *Nannochloropsis limnetica* sob o efeito de gases de combustão da casca de arroz. A modelagem da dissolução de SO_x e CO₂ através da transferência de massa entre fases no meio de cultivo de 30 L por 4 dias. Obtendo um máximo crescimento de biomassa com 12 % de CO₂ e 25 ppm de SO_x numa taxa de fluxo de 3 L min⁻¹.

PRADHAN et al. (2015) construiu uma modelagem validada experimentalmente sobre o crescimento de microalga *Rhizocloniumhie roglypticum* JUCHE2, num meio de cultivo baixo o efeito da dissolução da concentração de CO₂ sintético. A validação foi feita num fotobiorreator tipo painel plano de bolha de 1,8 L de cultivo, onde a biomassa tem o máximo crescimento com 25 % de CO₂ durante um período de 9 dias.

FERNÁNDEZ e colaboradores. (2016) calibraram e validaram uma modelagem para avaliar fenômenos biológicos e físicos na produção de microalgas. Esta modelagem avaliou o efeito da luz, a dissolução do CO₂ e O₂ no meio de cultivo a escala de engenharia em fotobiorreator aberto *raceway* (de canais) contendo a espécie de microalga *Scenedesmus almeriensis* (CCAP 276/24). Para a modelagem de dissolução foi utilizada a transferência de massa do O₂ e do CO₂ do ar atmosférico, comparando-o com o efeito no crescimento da microalga.

GARCÍA-CUBERO et al.(2017) fez um experimento sobre 8 tipos de microalgas e cianobactérias, baixo o efeito de gás de combustão sintético. Neste experimento encontraram que a microalga *Scenedesmus vacuolatus* foi a que obteve maior crescimento de biomassa com relação às outras espécies cultivadas. Sendo assim, eles desenvolveram um modelo matemático para crescimento desta microalga em função da diluição do CO₂, temperatura, pH e irradiância.

Todos estes estudos estão resumidos na TABELA 2, notando-se que a validação dos modelos desenvolvidos estão aplicados em escala laboratorial e a maioria destes modelos estudam o comportamento do CO₂ como componente principal dos gases de combustão, no cultivo de microalgas. Em resumo, para a otimização do processo de fixação de gases de combustão as microalgas precisam uma concentração específica destes gases, o qual é determinado experimentalmente e ajustado no modelo matemático. No entanto, os gases de combustão influem negativamente no ambiente e podem influir positivamente na obtenção de biomassa de microalgas para distintas aplicações.

TABELA 2 – MODELAGEM MATEMÁTICA DE CAPTURA DE GASES DE COMBUSTÃO POR CULTIVO DE MICROALGAS

Referencia	Objetivo	Fonte dos gases	Componente Gasoso avaliado	Espécie de microalga	Volume do FBR (mL)	Conclusão
HE et al., 2013	Modelar e otimizar o crescimento de microalgas utilizando gás de combustão.	Combustão de GNV	CO ₂	<i>Chlorella sp.</i>	200	Maior crescimento de microalga com gás-on exposição a gases de combustão 10 segundos e 5-9 min gás-of com exposição ao ar do ambiente.
VALIORGUE et al., 2014	Determinar uma expressão que modele a influência das transferências de massa de CO ₂ no cultivo de microalga.	CO ₂ sintético	CO ₂	<i>Neochlorisoleoa bundans</i>	117e3	Um bom acordo entre a dissolução experimental e os resultados preditos pela modelagem.
RONDA et al., 2014	Desenvolver uma modelagem matemática para o crescimento da microalga com efeito do gás de combustão.	Combustão da casca de arroz	SO _x , CO ₂	<i>Nannochloropsis limnetica</i>	3e4	A calibração do modelo com a medição foi para 12 % de CO ₂ e 25 ppm de SO _x com uma vazão de 3 Lmin ⁻¹ .
PRADHAN et al., 2015	Modelar e validar experimentalmente o crescimento da microalga sob o efeito de CO ₂ e a intensidade da luz.	CO ₂ sintético	CO ₂	<i>Rhizocloniumhie roglyphicum</i> JUCHE2	1,8e3	A exposição de 25 % de CO ₂ no cultivo obteve um bom rendimento de crescimento da microalga, no modelo e na validação experimental.
FERNÁNDEZ et al., 2016	Validar e calibrar um modelo matemático de fenômeno biológico e transferência de massa no cultivo de microalga	Ar do ambiente	CO ₂	<i>Scenedesmusal meriensis</i>	23,5e3	O modelo foi calibrado e validado em fotobiorreator aberto. Limitando-se a condições de temperatura na perda por evaporação.
GARCÍA-CUBERO et al., 2017	Realizar experimento e desenvolver um modelo matemático sobre o crescimento da microalga pelo consumo de gás de combustão	Gás de combustão simulado	CO ₂	<i>Scenedesmusva cuolatus</i>	2e3	Maior geração de biomassa de <i>Scenedesmus vacuolatus</i> com relação às outras 8 espécies cultivadas

FONTE: A autora (2018).

2.7 DESAFIOS

A revisão bibliográfica mostrada apresenta alguns modelos matemáticos aplicados em sistema de captura de gases de combustão em cultivo de microalgas, em escala laboratorial. Além disso, só foram encontrados modelos de transferência de massa do CO₂ no meio de cultivo, sem a utilização da coluna de fixação. Com base na revisão bibliográfica da Tabela 2 são listados os seguintes desafios identificados como lacunas no meio científico:

- a) O desenvolvimento de um modelo matemático para a transferência de massa numa coluna de fixação de 9 m de altura, onde a coluna serve como meio de maior aproveitamento da transferência;
- b) Há falta de modelos para avaliação da dissolução de dióxido de enxofre e nitrogênio das emissões, além da avaliação do modelo para cada um destes;
- c) Há necessidade de aplicação do processo de fixação de emissões com as microalgas em fotobiorreatores em escala de engenharia, validando o modelo;
- d) O desenvolvimento do processo que levem a parametrização e caracterização para melhor desempenho.

2.8 OBJETIVOS

2.8.1 Objetivo Geral

Modelar, simular, parametrizar e ajustar um sistema de fixação de emissões de um grupo motogerador, aumentando o crescimento de microalgas em fotobiorreatores de escala industrial.

2.8.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos:

- a) Desenvolvimento de um modelo matemático para o sistema;
- b) Análise paramétrica determinando os impactos na resposta do sistema, identificando oportunidades para otimização termodinâmica;
- c) Realizar o processo experimental do sistema para validação;
- d) Realizar ajuste experimental do modelo matemático para um conjunto de dados experimentais realizados

3 MATERIAL E MÉTODOS

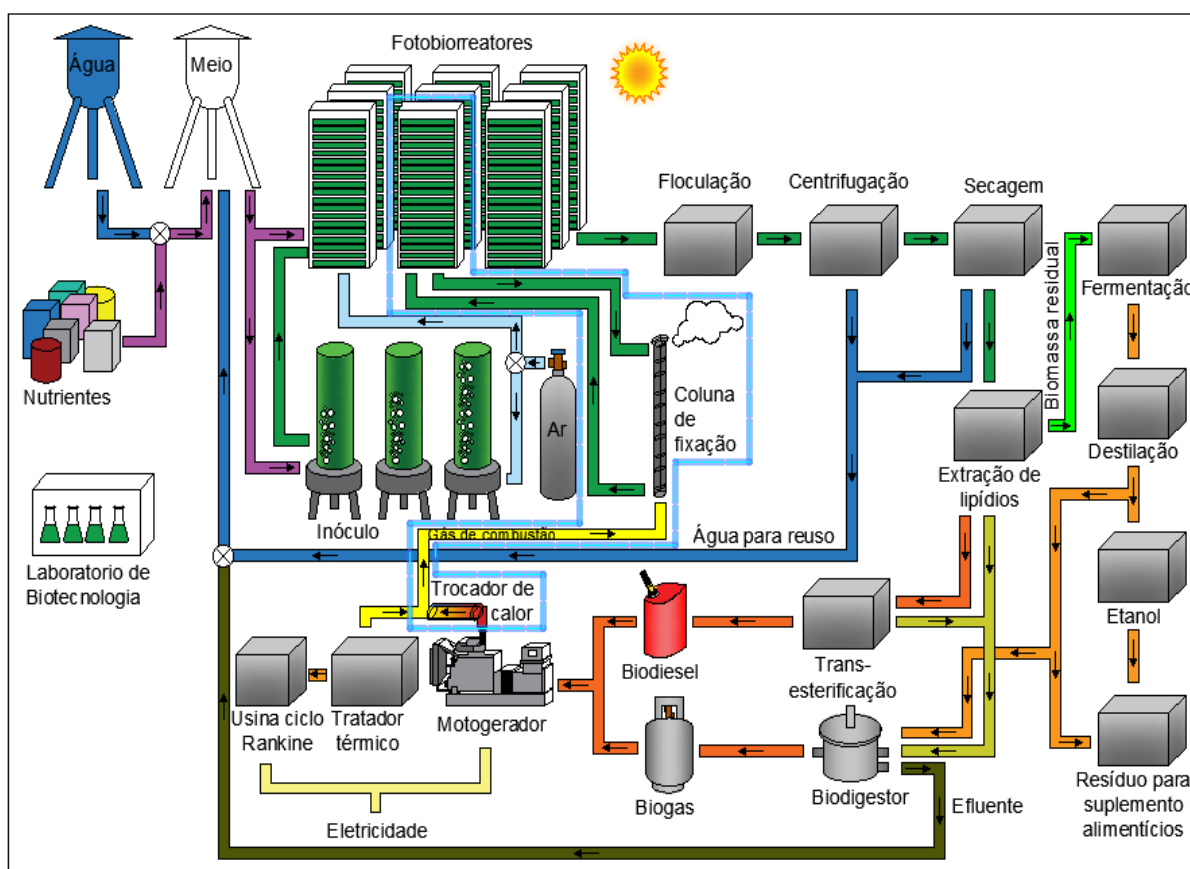
Este capítulo apresenta as ferramentas utilizadas tanto para a modelagem matemática como para a realização experimental do sistema de fixação de gases numa coluna com um meio de cultivo de microalga, assim ajustando a modelagem.

O trabalho foi realizado no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS), localizado na Universidade Federal de Paraná (UFPR). O NPDEAS tem como objetivo autossustentar-se energeticamente a partir de biomassa de microalga, mediante o processo mostrado a FIGURA 4. O processo do NPDEAS apresenta vários subsistemas, anexando as alternativas encontradas em cada pesquisa. Para este procedimento primeiro é preparado o inóculo de microalgas que posteriormente é colocado no cultivo a grande escala com a utilização de nutrientes. Os nutrientes usados no meio de cultivo são produtos oriundos de efluentes suíno, gases de combustão provenientes do motogerador ou do tratador térmico e produtos reciclados do mesmo processo. Os cultivos são realizados em sistema de batelada e quando chega ao fim da fase estacionária (FIGURA 2) é realizada a separação com floculante natural seguida pela centrifugação e secagem de biomassa. A biomassa seca é utilizada para extração de lipídios que posteriormente é transesterificado para produção de biodiesel. As microalgas são estudadas também para obtenção de outros subprodutos combustíveis como bioetanol e para suplemento alimentício de animais.

Depois de obter estes subprodutos os resíduos são tratados num biodigestor, no qual produz biogás. Com os biocombustíveis, o laboratório pretende usar no motogerador gerando parte de energia do prédio. Outra fonte pretendida de geração de energia é através do tratador térmico que aproveita o calor da queima no ciclo Rankine. Os gases gerados do motogerador e do tratador térmico são enviados à uma coluna de fixação com cultivo de microalgas, no qual os gases são capturados pelas microalgas, diminuindo assim a concentração de emissões no meio ambiente.

Este trabalho foca na captura de gases de exaustão provenientes do gerador de energia elétrico. Portanto, para estudar o processo, pesquisas do laboratório (CORRÊA, 2015; FINGER, 2018) constataram a possibilidade de captura de gases de combustão no meio de cultivo das microalgas e o crescimento destes microrganismos em função dos mesmos.

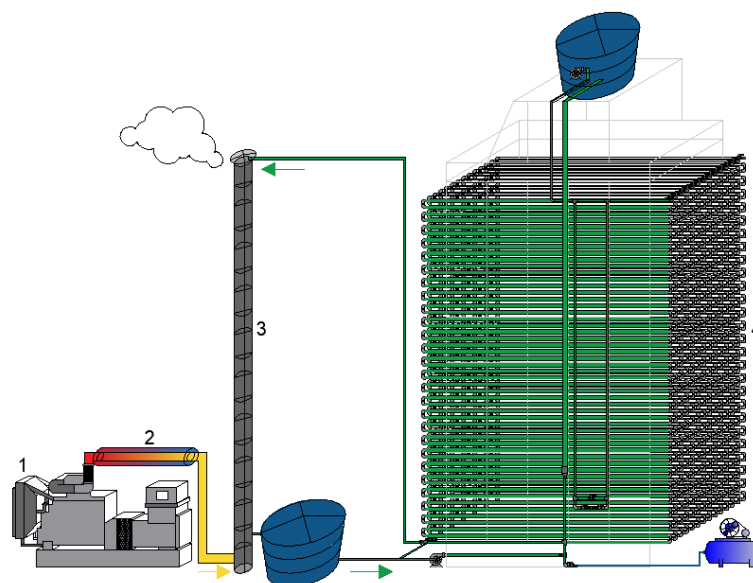
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO NPDEAS



FONTE: adaptado de SATYANARAYANA; MARIANO e VARGAS (2011).

Corroborada na seção 2.5 a captura de gases por meio do cultivo de microalgas e a falta de modelos matemáticos (seção 2.6.2) para aprimorar o sistema, esta dissertação apresenta a modelagem matemática do processo e o processo experimental realizado no NPDEAS especificamente para ajuste do modelo. O sistema é representado na FIGURA 5, onde os gases de combustão são emitidos por um motogerador (1) que logo na saída são resfriados no trocador de calor (2). Estes gases em temperatura ambiente são colocados em uma coluna (3) a qual está circulada por cultivo de microalga, desta forma os gases são fixados no meio do cultivo. O cultivo de microalga é proveniente do fotobiorreator compacto (FBR) (4), o qual permite o crescimento da microalga pelo consumo de nutrientes (provenientes de gases de combustão e dejetos suínos) e pelo processo de fotossíntese.

FIGURA 5 – SISTEMA DE ACOPLAMENTO DE EMISSÕES COM O CULTIVO DE MICROALGAS



FONTE: a autora (2018).

LEGENDA: 1 - Motogerador, 2 - Trocador de calor, 3 - Coluna de fixação, 4 - FBR

3.1 MODELO MATEMÁTICO

Adota-se o Método de Elemento de Volume (MEV) para a modelagem aplicada ao sistema mostrado na FIGURA 5, analisando duas grandezas físicas: temperatura e transferência de massa. É analisada a temperatura do gás de combustão e transferência de massa entre este gás e o cultivo de microalgas, assim como o crescimento da biomassa da microalga. As grandezas se baseiam na primeira lei da termodinâmica do princípio de conservação da energia e na lei de conservação de massa:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e h_{t_e} - \dot{m}_s h_{t_s} \quad (1)$$

$$\frac{\partial m_s}{\partial t} = \dot{m}_e - \dot{m}_s + \dot{m}_g - \dot{m}_c \quad (2)$$

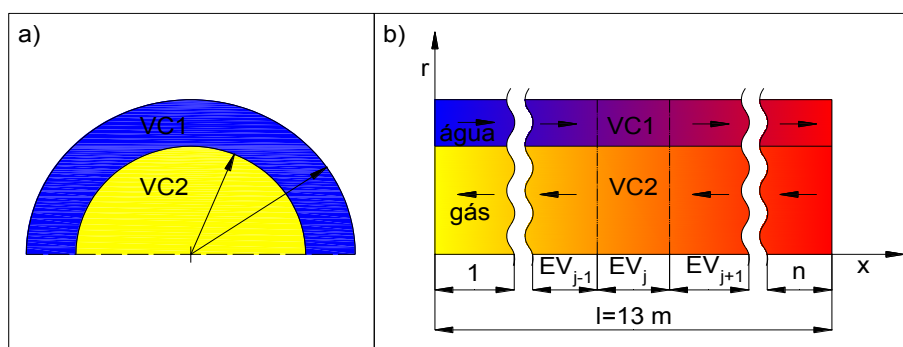
onde, E é a energia total em forma de energia cinética, potencial e interna; \dot{Q} a taxa de transferência de calor; \dot{W} o trabalho; \dot{m} a vazão mássica; h_t a entalpia; m_s a massa, t o tempo. Sendo como subscrito: e para entradas, s saída, g para geração de massa e c para consumo de massa. As equações formadas por Equações

Diferenciais Ordinárias (EDOs) são aplicadas a cada EV, avaliadas em regime transiente.

3.1.1 Modelagem matemática do resfriamento dos gases da combustão

Para a análise matemática do resfriamento dos gases de combustão, o trocador de calor casco e tubo é dividido em dois VC mostrados na FIGURA 6a. O VC1 representa a água do tubo exterior e o VC2 o gás no tubo interior, e cada um dos VC é dividido em elementos de volume (FIGURA 6b).

FIGURA 6 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO TROCADOR DE CALOR



FONTE: a autora (2018).

LEGENDA: a) Volume de controle dos tubos concêntricos
 b) Divisão dos volumes de controle em elementos de volume

Nesta modelagem do VC1 e VC2 utiliza-se o princípio da conservação de energia e a conservação da massa Eq(1) e Eq(2) respectivamente, aplicados aos sistemas abertos.

Hipóteses para o sistema de resfriamento:

- Não há trabalho realizado na fronteira do sistema ($\partial w/\partial t=0$);
- Os líquidos são incompressíveis ($\partial p/\partial t=0$), onde p é o trabalho;
- O sistema de resfriamento não se encontra em regime permanente $T(t)$, onde T é a temperatura;
- A vazão mássica do gás e da água é constante, portanto não há variação de massa dentro do volume de controle ($\partial m_s/\partial t=0$);
- O sistema não tem geração nem consumo de massa ($m_g = 0, m_c = 0$);
- A variação de energia dentro do volume de controle está governada pela variação da energia interna U ($E=U$).

Definições:

- A energia interna é dada por $U = ms.u$, onde u é a energia interna específica;
- O calor específico a volume constante (C_v) é dado por $C_v = \frac{\partial u}{\partial T}$;
- O calor específico a pressão constante (C_p) é dado por $C_p = \frac{\partial ht}{\partial T}$.

A taxa de transferência de calor entre VC1 e VC2 é calculada por:

$$\dot{Q} = U_g A (T_2 - T_1) \quad (3)$$

onde A é a área da secção transversal de troca de calor entre o VC1 e o VC2, T_2 a temperatura do VC2, T_1 a temperatura do VC1, U_g é o coeficiente de transferência de calor para tubos circular e está dado pela seguinte equação:

$$U_g = \frac{1}{\frac{A_1}{A_2 h_{c2}} + \frac{A_1 \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2k_c \pi l} + \frac{1}{h_{c1}}} \quad (4)$$

onde U_g representa a transferência de calor por condução e por convecção entre o VC1 e o VC2. h_c é o coeficiente convectivo de transferência de calor, l representa a longitude do trocador de calor no eixo x , r_1 e r_2 o raio do VC1 e VC2, respectivamente. K_c é o coeficiente de condutividade térmica do material, no caso, aço inoxidável. A_1 e A_2 representa a área do tubo exterior e interior, respectivamente.

As áreas são descritas nas seguintes equações:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 \quad (6)$$

$$A = 4\pi d_2 l \quad (7)$$

onde d representa o diâmetro dos tubos do trocador de calor.

Os coeficientes de convecção 1 e 2 são correlacionados com o número de Reynolds (Re) da equação:

$$Re = \frac{V_{el} D_h}{\nu} \quad (8)$$

onde V_{el} é a velocidade do fluido, D_h o diâmetro hidráulico, e ν a viscosidade do fluido. O cálculo de D_h para o VC1 e VC2 é representado nas equações embaixo:

$$D_{h_1} = 4 \frac{A_1}{Pr_{ág}} = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1} \quad (9)$$

$$D_{h_2} = 4 \frac{A_2}{Pr_{gás}} = d_2 \quad (10)$$

Onde $Pr_{ág}$ representa o número de Prandtl da água e $Pr_{gás}$ o número de Prandtl do gás.

Calculando o número de Reynolds para o VC1 e VC2 com os dados da TABELA 3, obtém-se um valor maior que 2500, sendo fluxo turbulento para os dois fluidos: $Re_1 = 7173,12$ e $Re_2 = 26262,50$. Portanto, para esse número de Reynold os cálculos de h_{c1} e h_{c2} são realizados pela relação de Dittus e Boelter para convecção forçada com fluxo turbulento em dutos onde $l/d > 60$ (BEJAN, 2013) relacionado ao número de Nussel. Os valores do número de Prandtl da água e do gás são tomados da TABELA 3. A Eq. é dado por:

$$Nu = \frac{h_c \cdot d}{k_c} = 0,023 Re^{\frac{4}{5}} Pr^n \begin{cases} 0,7 \leq Pr \leq 120 \\ 2500 \leq Re \leq 1,24 \times 10^5 \end{cases} \begin{cases} n = 0,4 \text{ fluido sendo aquecido} \\ n = 0,3 \text{ fluido sendo resfriado} \end{cases} \quad (11)$$

Substituindo a definição do calor específico a volume constante (o C_v não varia por tanto $C_v = C_p$) na definição da energia interna ($\partial U = m s \partial u = m C_p \partial T$) e as hipóteses, a definição do calor específico a pressão constante e as Eq.(2) - (11) na Eq. (1) para o esquema dos EV_j do VC1 da FIGURA 6b, e os EV_j do VC2 se desenvolve:

$$\frac{\partial T_{1j-1}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{ág}} c_{p,\text{ág}} (T_{e,\text{ág}} - T_{1j-1}) + U_g A (T_{2j-1} - T_{1j-1}) \right] / ms_{\text{ág}} C_{p,\text{ág}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_{2j-1}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{gás}} c_{p,\text{gás}} (T_{2j} - T_{2j-1}) - U_g A (T_{2j-1} - T_{1j-1}) \right] / ms_{\text{gás}} C_{p,\text{gás}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T_{1j}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{ág}} c_{p,\text{ág}} (T_{1j-1} - T_{1j}) + U_g A (T_{2j} - T_{1j}) \right] / ms_{\text{ág}} C_{p,\text{ág}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial T_{2j}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{gás}} c_{p,\text{gás}} (T_{2j+1} - T_{2j}) - U_g A (T_{2j} - T_{1j}) \right] / ms_{\text{gás}} C_{p,\text{gás}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_{1j+1}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{ág}} c_{p,\text{ág}} (T_{1j} - T_{1j+1}) + U_g A (T_{2j+1} - T_{1j+1}) \right] / ms_{\text{ág}} C_{p,\text{ág}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial T_{2j+1}}{\partial t} = \left[\dot{m}_{\text{gás}} c_{p,\text{gás}} (T_{e,\text{gás}} - T_{2j+1}) - U_g A (T_{2j+1} - T_{1j+1}) \right] / ms_{\text{gás}} C_{p,\text{gás}} \quad (17)$$

Onde $ms_{\text{ág}}$ se refere à massa de água e $ms_{\text{gás}}$ à massa de gás do sistema.

TABELA 3 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DO TROCADOR DE CALOR

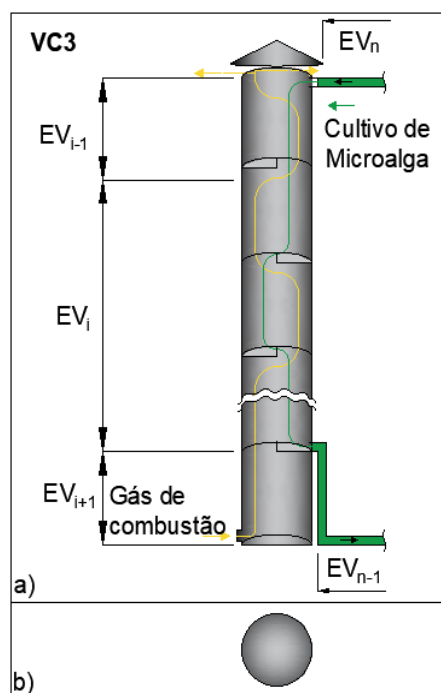
Parâmetro físico ou geométrico	Valor	Referencia
Calor específico a pressão constante da água	4,182 [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Calor específico a pressão constante do gás	1,008 [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Calor específico a volume constante do gás	0,721 [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Coefficiente de condutividade da água	640×10 ⁻³ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Coefficiente de condutividade do gás	37×10 ⁻³ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Coefficiente de condutividade térmica (Aço)	50,2 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	MORAN et al., 2010
Densidade da água	998 [kg.m ⁻³]	MORAN et al., 2010
Densidade do gás	1,11 [kg.m ⁻³]	MORAN et al., 2010
Diâmetro do VC1	0,15 [m]	Neste experimento
Diâmetro do VC2	0,11 [m]	Neste experimento
Longitude do trocador de calor	13,0 [m]	Neste experimento
Número de Prandtl para a água	3,770	BEJAN 2013
Número de Prandtl para o gás	0,686	BEJAN 2013
Temperatura de entrada a água no VC1	295,6 [K]	Neste experimento
Temperatura de entrada do gás no VC2	423,15 [K]	Neste experimento
Vazão volumétrico dos gases de combustão	35000 [L.h ⁻¹]	Neste experimento
Velocidade da água no VC1	0,2 [m.s ⁻¹]	Neste experimento
Velocidade do gás no VC2	15,0 [m.s ⁻¹]	Neste experimento
Viscosidade cinemática da água	0,66×10 ⁻⁶ [m ² .s]	BEJAN 2013
Viscosidade cinemática do gás	32×10 ⁻⁶ [m ² .s]	BEJAN 2013

FONTE: a autora (2018)

3.1.2 Balanço de massa para a reação dos componentes no VC3 (coluna de fixação)

O modelo matemático nesta seção representa a transferência de massa dos fluidos em contracorrente (o gás de combustão e o cultivo de microalgas) que acontece no VC3. Todo este sistema é dividido em subsistemas EV_i representado esquematicamente na FIGURA 7. Neste modelo, analisam-se as reações que acontecem com relação à transferência de massa e a taxa de diluição do CO_2 , NO_2 e SO_2 nesse meio de cultivo contendo microalgas.

FIGURA 7 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO SISTEMA DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA ENTRE OS GASES DE COMBUSTÃO E O CULTIVO DE MICROALGAS NA COLUNA DE FIXAÇÃO



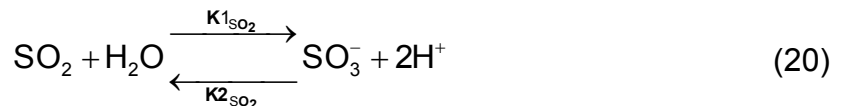
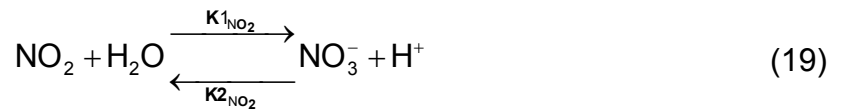
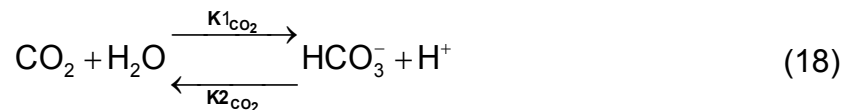
FONTE: a autora (2018)
 LEGENDA: a) Vista frontal
 b) Vista inferior

Hipóteses aplicadas para análise na coluna de fixação:

- Gases relevantes a analisar: dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2);
- A concentração molar não está em regime permanente $[CO_2](t)$;
- Usa-se a lei dos gases ideais ($pV = NRT$), onde V é o volume do EV, N o número de mols do composto avaliado e R a constante universal dos gases;

- A solubilidade dos gases é dada pela lei de Henry ($S = pH$), onde p a pressão parcial do gás e H a constante de Henry;
- O sistema de transferência de massa é dado por $Tr = KLa(S - [.]_{aq})$, onde KLa representa o coeficiente de transferência de massa entre o gás e o meio aquoso, S a solubilidade do gás e $[.]_{aq}$ a concentração molar do componente;
- É desprezado o crescimento das microalgas porque se considera que não ocorre fotossíntese nas paredes escuras da coluna de fixação $\mu = 0$;
- A velocidade dos fluidos é constante ($\partial V_{el} / \partial t = 0$).

A reação química dos gases CO_2 , NO_2 e SO_2 na água (KRUMOV, 2016) do meio de cultivo é mostrada nas seguintes equações:



as constantes $K1$ e $K2$ descrevem a reação direta e a reação reversa, respectivamente, de cada componente do subscrito. H^+ representa o hidrogênio atômico, HCO_3^- íon bicarbonato, NO_3^- nitrato, SO_3^- sulfito

Substitui-se a equação da lei dos gases ideais na equação da lei Henry $S = \frac{N}{V} RTH$, onde $\frac{N}{V} = [.]_{gás}$. Aplicando esta substituição na equação de transferência de massa a os três gases avaliados, torna-se:

$$Tr_{CO_2} = KLa_{CO_2} \left([CO_2]_{gás} R.T.H_{CO_2} - [CO_2]_{aq} \right) \quad (21)$$

$$\text{TrNO}_2 = \text{Kla}_{\text{NO}_2} \left([\text{NO}_2]_{\text{gás}} R.T_i.H_{\text{NO}_2} - [\text{NO}_2]_{\text{aq}} \right) \quad (22)$$

$$\text{TrSO}_2 = \text{Kla}_{\text{SO}_2} \left([\text{SO}_2]_{\text{gás}} R.T_i.H_{\text{SO}_2} - [\text{SO}_2]_{\text{aq}} \right) \quad (23)$$

Onde o subscrito gás representa o estado gasoso do elemento e o subscrito aq refere-se ao componente em estado aquoso.

A representação do acúmulo de massa (C) no EV, como sistema aberto, para compostos em estado gasoso e aquoso é dado por:

$$\text{CCO}_2 = [\text{CO}_2]_{\text{en}} - [\text{CO}_2]_{\text{sai}} \quad (24)$$

$$\text{CNO}_2 = [\text{NO}_2]_{\text{en}} - [\text{NO}_2]_{\text{sai}} \quad (25)$$

$$\text{CSO}_2 = [\text{SO}_2]_{\text{en}} - [\text{SO}_2]_{\text{sai}} \quad (26)$$

$$\text{CHCO}_3^- = [\text{HCO}_3^-]_{\text{en}} - [\text{HCO}_3^-]_{\text{sai}} \quad (27)$$

$$\text{CNO}_3^- = [\text{NO}_3^-]_{\text{en}} - [\text{NO}_3^-]_{\text{sai}} \quad (28)$$

$$\text{CSO}_3^- = [\text{SO}_3^-]_{\text{en}} - [\text{SO}_3^-]_{\text{sai}} \quad (29)$$

$$\text{CH}^+ = [\text{H}^+]_{\text{en}} - [\text{H}^+]_{\text{sai}} \quad (30)$$

Aplicam-se as hipóteses do VC3, as reações químicas dos componentes gasosos com o cultivo, as definições e concentrações de transferência de massa dos componentes diluídos Eq.(18) até Eq.(23) na Eq.(2) para os EV i. Considerando a transferência de massa entre o gás e a fase líquida do cultivo de microalgas e desconsiderando a produção de biomassa, as equações se tornam:

$$\frac{d[\text{CO}_2]_{\text{gas},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{gas}}}{V_3} (\text{CCO}_2)_{\text{gas}} + \text{TrCO}_2 \quad (31)$$

$$\frac{d[\text{NO}_2]_{\text{gas},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{gas}}}{V_3} (\text{CNO}_2)_{\text{gas}} + \text{TrNO}_2 \quad (32)$$

$$\frac{d[\text{SO}_2]_{\text{gas},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{gas}}}{V_3} (\text{CSO}_2)_{\text{gas}} + \text{TSO}_2 \quad (33)$$

$$\frac{d[\text{CO}_2]_{\text{aq},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CCO}_2)_{\text{aq}} + \text{TrCO}_2 - K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} + K2_{\text{CO}_2} [\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] \quad (34)$$

$$\frac{d[\text{HCO}_3^-]_i}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CHCO}_3^-) + K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{CO}_2} [\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] \quad (35)$$

$$\frac{d[\text{NO}_2]_{\text{aq},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CNO}_2)_{\text{aq}} + \text{TrNO}_2 - K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} + K2_{\text{NO}_2} [\text{H}^+] [\text{NO}_3^-] \quad (36)$$

$$\frac{d[\text{NO}_3^-]_i}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CNO}_3^-)_{\text{aq}} + K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{NO}_2} [\text{H}^+] [\text{NO}_3^-] \quad (37)$$

$$\frac{d[\text{SO}_2]_{\text{aq},i}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CSO}_2)_{\text{aq}} + \text{TrSO}_2 - K_{\text{SO}_2} [\text{SO}_2]_{\text{aq}} + K2_{\text{SO}_2} [\text{H}^+] [\text{SO}_4^-] \quad (38)$$

$$\frac{d[\text{SO}_3^-]_i}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CSO}_3^-)_{\text{aq}} + K_{\text{SO}_2} [\text{SO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{SO}_2} [\text{H}^+] [\text{SO}_4^-] \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[\text{H}^+]_i}{dt} = & \frac{Q_{\text{liq}}}{V_3} (\text{CH}^+) + K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{CO}_2} [\text{H}^+] [\text{CO}_3^-] + K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{NO}_2} [\text{H}^+] [\text{NO}_3^-] \\ & + K_{\text{SO}_2} [\text{SO}_2]_{\text{aq}} - K2_{\text{SO}_2} [\text{H}^+] [\text{SO}_4^-] \end{aligned} \quad (40)$$

onde Q_{liq} é a vazão do cultivo, V_3 é o volume da coluna de fixação para cada um dos subscritos no cultivo de microalga.

O acúmulo da biomassa neste VC3 é representado por:

$$\frac{d[X]_i}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_c} (X_e - X_s) \quad (41)$$

onde X representa a biomassa de microalga.

TABELA 4 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DA COLUNA DE FIXAÇÃO

Parâmetro físico ou geométrico	Valor	Referencia
Coefficiente de transferência de massa do CO ₂	10-10000 [h ⁻¹]	BALMANT et al., 2016
Coefficiente de transferência de massa do NO ₂	10-10000 [h ⁻¹]	BALMANT et al., 2016
Coefficiente de transferência de massa do SO ₂	10-10000 [h ⁻¹]	BALMANT et al., 2016
Concentração inicial de biomassa de microalga	0,106 [g.L ⁻¹]	Neste experimento
Concentração molar de entrada do CO ₂ no VC3	4x10 ⁻² [mol.L ⁻¹]	Neste experimento
Concentração molar de entrada do NO ₂ no VC3	2x10 ⁻³ [mol.L ⁻¹]	Neste experimento
Concentração molar de entrada do SO ₂ no VC3	1x14 ⁻⁴ [mol.L ⁻¹]	Neste experimento
Constante da lei de Henry para o CO ₂	3,4x10 ⁻² [mol.L ⁻¹ .atm ⁻¹]	CARDOSO et al., 1998
Constante da lei de Henry para o NO ₂	1x10 ⁻² [mol.L ⁻¹ .atm ⁻¹]	CARDOSO et al., 1998
Constante da lei de Henry para o SO ₂	1,24 [mol.L ⁻¹ .atm ⁻¹]	CARDOSO et al., 1998
Constante de reação direta do CO ₂	60x10 ² [h ⁻¹]	MITCHELL et al.,2010
Constante de reação direta do NO ₂	10-10000 [h ⁻¹]	BALMANT et al., 2016
Constante de reação direta do SO ₂	10-10000 [h ⁻¹]	BALMANT et al., 2016
Constante universal dos gases	0,082057 [atm.L.mol ⁻¹ .K ⁻¹]	BIRD et al., 2002
Massa molar do CO ₂	44,01 [g.mol ⁻¹]	BIRD et al., 2002
Massa molar do NO ₂	44,012 [g.mol ⁻¹]	BIRD et al., 2002
Massa molar do SO ₂	64,065 [g.mol ⁻¹]	BIRD et al., 2002
Vazão volumétrico do cultivo	3000 [L.h ⁻¹]	Neste experimento
Volume da coluna de fixação	1000 [L]	Neste experimento

FONTE: a autora (2018)

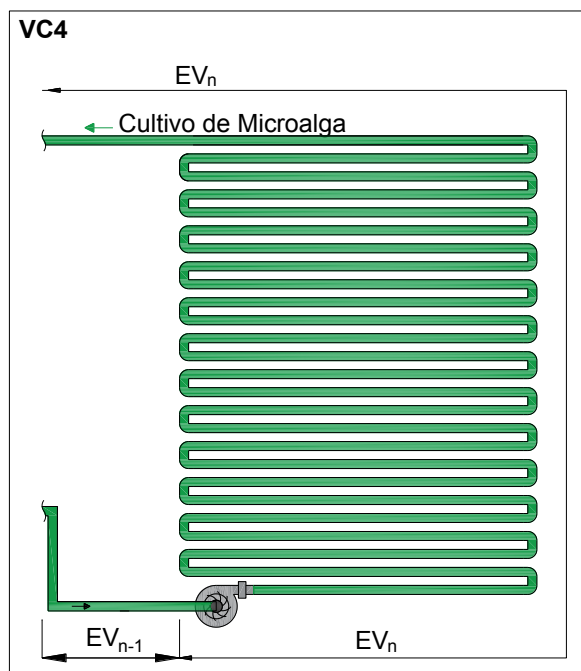
3.1.3 Modelo matemático do FBR

O VC4 é constituído pelo FBR compacto (FIGURA 8) formado por tubos de parede transparente. Este volume de controle é dividido em EV_n para analisar a transferência de massa dos fluidos e a influência dos gases no crescimento cinético da microalga.

Hipóteses aplicada à análise da modelagem no FBR

- Cultivo de microalga da espécie *Acutodesmus obliquus* com metabolismo autotrófico.
- Para representar o processo de consumo de gases pelas microalgas é usada a equação de Pruvost. et. al. (2016).
- A velocidade específica de crescimento das microalgas (μ) depende da temperatura, intensidade da luz e dos nutrientes: CO₂, NO₂, SO₂.
- O crescimento das microalgas ocorre somente no FBR pelo processo de fotossínteses devido à captura de luz nos tubos transparente que o compõem.

FIGURA 8 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO FBR



FONTE: a autora (2018).

A temperatura ambiente (T_{∞}) durante o ciclo diário de 12 h (43200 s) é aproximada com a equação seguinte:

$$T_{\infty} = T_{\min} + \frac{\Delta T}{2} - \frac{\Delta T}{2} \cos \left[\frac{\pi(t - t_0)}{43200} \right] \quad (42)$$

onde T_{\min} é a temperatura mínima durante este ciclo, ΔT é a variação da temperatura máxima e mínima registrada segundo o SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná (APÊNDICE A), t é o tempo de simulação e t_0 o tempo inicial de simulação.

Na equação de Pruvost. et al. (2016) representa-se o bioprocesso da microalga para converter os nutrientes e a luz em biomassa e oxigênio:



onde N_{tot} é o nitrogênio total, S_{tot} é o enxofre total, CHONS é a composição de biomassa da microalga e O_2 é o oxigênio liberado pela microalga durante o processo.

A velocidade específica de crescimento das microalgas (μ) é influenciada por parâmetros dominantes no meio (KROUMOV et al., 2016):

$$\mu = \mu_{\max} [\mu(T_2) \mu(I_0) \mu(\text{CO}_2) \mu(\text{N}_{\text{tot}}) \mu(\text{S}_{\text{tot}})] \quad (44)$$

onde μ_{\max} é o crescimento específico máximo, e $\mu(T_2)$, $\mu(I_0)$, $\mu(\text{CO}_2)$, $\mu(\text{N}_{\text{tot}})$, $\mu(\text{S}_{\text{tot}})$ são a taxa de crescimento em função da temperatura ambiente, incidência luminosa, CO_2 , nitrogênio total e enxofre total do meio do cultivo, respectivamente.

$\mu(T_2)$ é representado pela equação embaixo a qual descreve uma equação quadrática dada por Pavlova et al. (2010):

$$\mu(T) = aT_{\infty}^2 + bT_{\infty} - c \quad (45)$$

onde a, b e c são constantes empíricas.

Para a velocidade de crescimento da microalga em função da intensidade luminosa é usada a equação de Aiba. S. (1982):

$$\mu(I_0) = \frac{I_{\text{med}}}{Ks_l + I_{\text{med}} + \frac{I_{\text{med}}^2}{K_i}} \quad (46)$$

onde Ks é a constante de saturação e K_i a constante de inibição. I_{med} é a intensidade luminosa média a qual é obtido pelo SIMEPAR (APÊNDICE A).

O crescimento da microalga em função do CO_2 é descrito pela equação de Andrew (1968):

$$\mu(\text{CO}_2) = \frac{[\text{CO}_2]}{Ks_{\text{CO}_2} + [\text{CO}_2] + \frac{[\text{CO}_2]^2}{K_{i_{\text{CO}_2}}}} \quad (47)$$

As equações a seguir representam o crescimento da microalga em função dos nutrientes de Nitrogênio total e enxofre total (ARAÚJO et al., 2009):

$$\mu(N_{\text{tot}}) = \left(\frac{[N_{\text{tot}}]}{K_{S_{N_{\text{tot}}}} + [N_{\text{tot}}]} \right) \quad (48)$$

$$\mu(S_{\text{tot}}) = \left(\frac{[S_{\text{tot}}]}{K_{S_{S_{\text{tot}}}} + [S_{\text{tot}}]} \right) \quad (49)$$

onde K_s é a constante de saturação e K_i a constante de inibição.

Aplicando-se na Eq. (2) as hipóteses da análise matemática do FBR, Eq. (42) até Eq. (49), e substituindo-se as concentrações de massa das Eq. (24) até Eq. (30) para os Elementos de Volume n , Temos as seguintes equações:

$$\frac{d[\text{CO}_2]_{\text{aq},n}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CCO}_2)_{\text{aq}} - K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} + K_{2_{\text{CO}_2}} [\text{H}^+] [\text{HCO}_3] \quad (50)$$

$$\frac{d[\text{HCO}_3]_n}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CCO}_3) + K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} - K_{2_{\text{CO}_2}} [\text{H}^+] [\text{HCO}_3] - Y_{\text{CO}_2/x} \cdot \mu \cdot X \quad (51)$$

$$\frac{d[\text{NO}_2]_{\text{aq},n}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CNO}_2)_{\text{aq}} - K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} + K_{2_{\text{NO}_2}} [\text{H}^+] [\text{NO}_3] \quad (52)$$

$$\frac{d[\text{NO}_3]_n}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CNO}_3)_{\text{aq}} + K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} - K_{2_{\text{NO}_2}} [\text{H}^+] [\text{NO}_3] - Y_{\text{NO}_2/x} \cdot \mu \cdot X \quad (53)$$

$$\frac{d[\text{SO}_2]_{\text{aq},n}}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CSO}_2)_{\text{aq}} - K_{\text{SO}_2} [\text{SO}_2]_{\text{aq}} + K_{2_{\text{SO}_2}} [\text{H}^+] [\text{SO}_3] \quad (54)$$

$$\frac{d[\text{SO}_3]_n}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CSO}_3)_{\text{aq}} + K_{\text{SO}_2} [\text{SO}_2]_{\text{aq}} - K_{2_{\text{SO}_2}} [\text{H}^+] [\text{SO}_3] - Y_{\text{SO}_2/x} \cdot \mu \cdot X \quad (55)$$

$$\frac{d[\text{H}^+]_n}{dt} = \frac{Q_{\text{liq}}}{V_{\text{FBR}}} (\text{CH}^+) + K_{\text{CO}_2} [\text{CO}_2]_{\text{aq}} - K_{2_{\text{CO}_2}} [\text{H}^+] [\text{CO}_3] + K_{\text{NO}_2} [\text{NO}_2]_{\text{aq}} - K_{2_{\text{NO}_2}} [\text{H}^+] [\text{NO}_3]$$

$$+K_{SO_2} [SO_2]_{aq} \quad K_{2SO_2} [H^+][SO_3] \quad (56)$$

onde Y é o coeficiente de rendimento que a microalga consome dos nutrientes dos subscritos CO_2/x , NO_2/x , SO_2/x , e o V_{FBR} refere-se ao volume do VC4 analisado.

O Balanço de massa para o crescimento da biomassa de microalga é dada por:

$$\frac{d[X]_n}{dt} = \frac{Q_{liq}}{V_{FBR}} (X_e - X_s) + \mu.X \quad (57)$$

TABELA 5 – CONDIÇÕES INICIAIS USADOS NO MODELO DO FBR

Parâmetro físico ou geométrico	Valor	Referencia
Coeficiente de rendimento de consumo de CO ₂	1,88 [g.g ⁻¹]	BALMANT et al., 2011
Coeficiente de rendimento de consumo de NO ₂	0,384 [g.g ⁻¹]	PRUVOST et al., 2009
Coeficiente de rendimento de consumo de SO ₂	0,043 [g.g ⁻¹]	PRUVOST et al., 2009
Constante a	-0,00291	PAVLIK et al., 2017
Constante b	0,8662	PAVLIK et al., 2017
Constante c	10,222	PAVLIK et al., 2017
Constante de saturação da luz	0,06	BALMANT et al., 2016
Constante de saturação do CO ₂	0,000463	BALMANT et al., 2016
Constante de saturação do N	0,25	BALMANT et al., 2016
Constante de saturação do S	0,1	BALMANT et al., 2016
Constante de inibição do CO ₂	0,10	BALMANT et al., 2016
Constante de inibição da luz	0,55	BALMANT et al., 2016
Crescimento específico máximo da <i>Acutodesmus obliquus</i>	0,67[L.h ⁻¹]	THIANSATHIT et al., 2015
Intensidade luminosa media	400,981 [W.m ⁻¹]	SIMEPAR (APÊNDICE A)
Temperatura mínima durante o cultivo	285.18[K]	SIMEPAR (APÊNDICE A)
Temperatura máxima durante o cultivo	300.15 [K]	SIMEPAR (APÊNDICE A)
Volume do FBR	2600 [L]	Neste experimento

FONTE: a autora (2018)

3.2 MÉTODO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE PARAMÉTRICA DO MODELO

Para a solução das EDOs dados pelas Eqs.(12)- (17), Eqs. (31) - (40) e Eqs. (50) - (57) foi usado o método de Runge-Kutta de quarta ordem (Vargas & Araki, 2017) em linguagem FORTRAN® obtendo convergência da solução em tempos relativamente curto para uma EDO de ordem intermediária. A TABELA 3, TABELA 4 e TABELA 5 trazemos parâmetros e condições iniciais para a simulação do modelo, os quais são obtidos de maneira experimental e da literatura.

A convergência das grandezas físicas simuladas do modelo foi constatada por refinamentos dos EV (EDITORIAL, 1994) e posteriormente verificado pelo cálculo da variação da norma euclidiana do domínio computacional entre refinamento dos EV (ϵ_{EV}) (VARGAS, 2013):

$$\epsilon_{EV} = \frac{\left| \|\text{var}\|_{EVI} - \|\text{var}\|_{EVII} \right|}{\|\text{var}\|_{EVI}} \leq 0,01 \quad (58)$$

Onde var representa as grandezas físicas avaliadas neste trabalho e os subscritos EVI e EVII representam os elementos de volume menos refinado e o mais refinado, respectivamente.

3.3 PROCESSO EXPERIMENTAL DO SISTEMA

O cultivo de microalga foi inoculado com a espécie *Acutodesmus obliquus* (FIGURA 9) (a qual é identificada e cultivada no NPDEAS) num FBR com volume de 2,6 m³ durante um período de 11 dias. Para a inoculação foi colocada $170 \pm 2,64 \times 10^4$ cells.mL⁻¹células (cells) de microalga com meio suíno biodigerido na proporção de 4 % v/v (do total do volume do cultivo) e o restante completado com água proveniente da chuva.

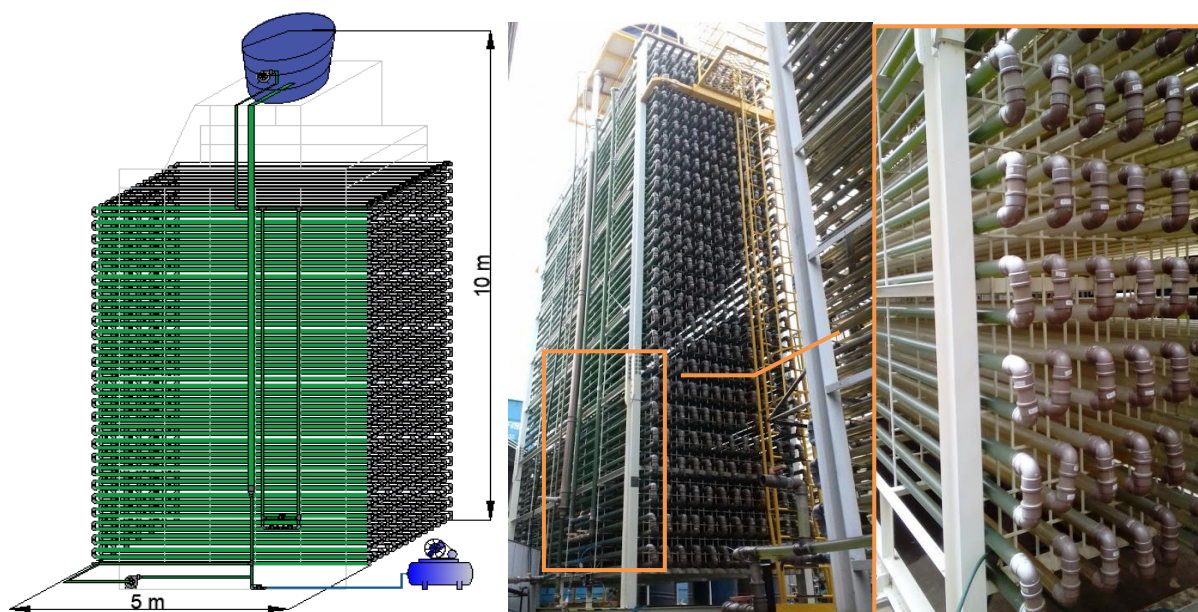
FIGURA 9 – MICROALGA *Acutodesmus obliquus* PRODUZIDA NO NPDEAS (aumento de 400X)



FONTE: a autora (2018).

O FBR utilizado é vertical (tipo fechado) de patente US20170073622A1 (VARGAS, 2016) mostrado na FIGURA 10, composto por tubos transparentes de 50 mm de diâmetro arranjados verticalmente em 13 ramais, dos quais é usado um para este experimento.

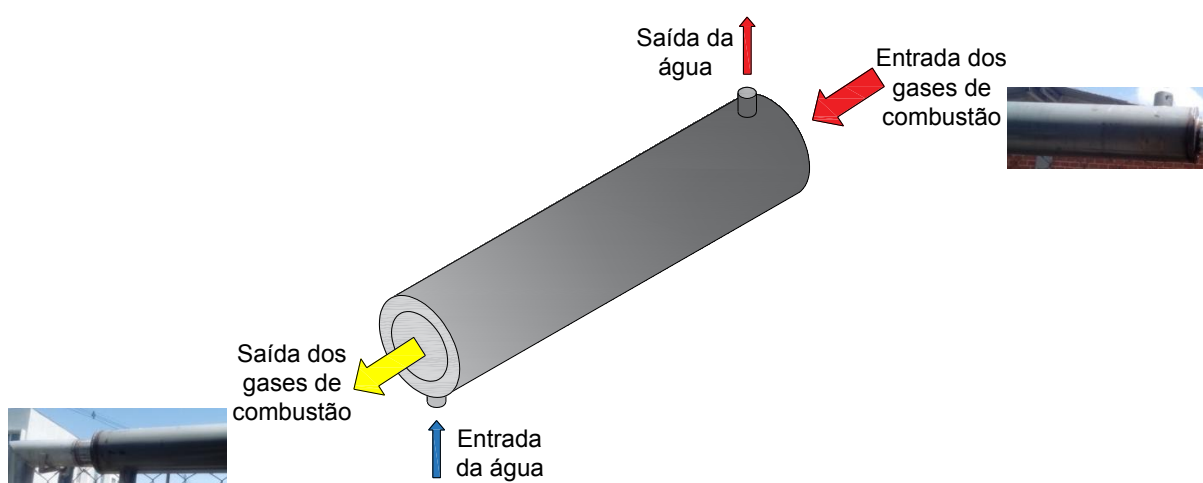
FIGURA 10 – FOTOBIORREATOR COMPACTO



FONTE: a autora (2018).

O FBR contém um compressor de gases o qual injeta ar do ambiente no cultivo a $56,54 \pm 1 \text{ L.min}^{-1}$ funcionando como degaseificador para remover o oxigênio liberado pelas microalgas. Possui uma caixa de 2000 L de volume que funciona como reservatório para circulação e para liberar o oxigênio do meio de cultivo, dentro dela é colocado uma bomba submersa, de 1 hp de potência nominal, para levar o cultivo da caixa aos tubos.

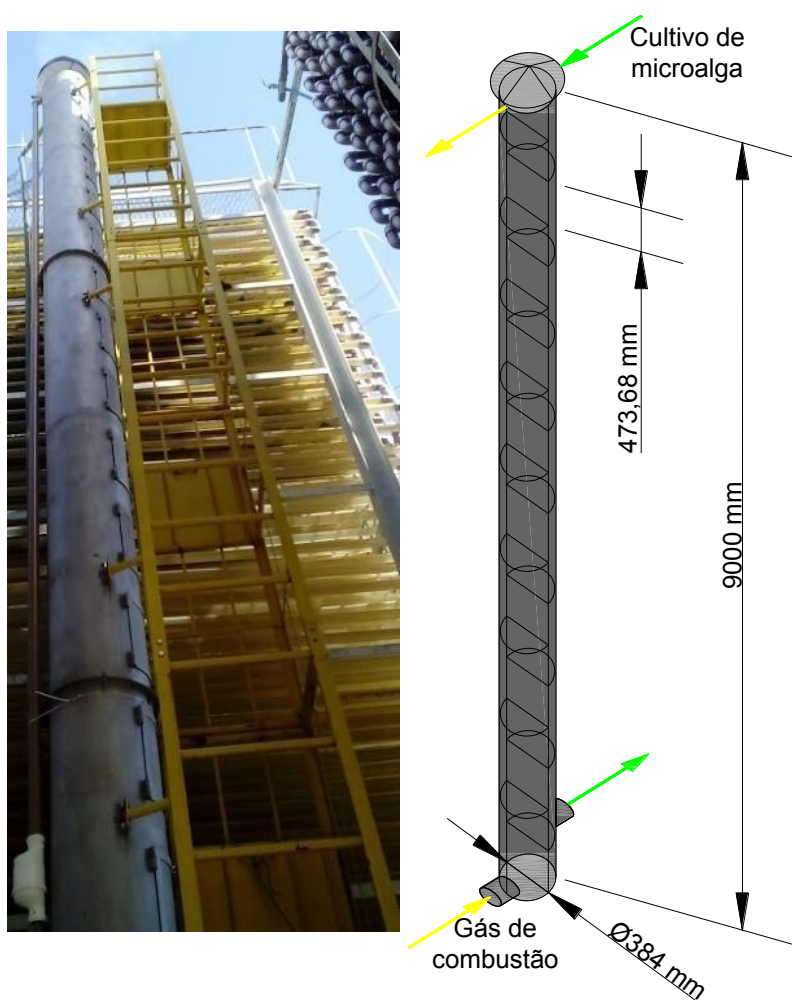
FIGURA 11 – TROCADOR DE CALOR



FONTE: a autora (2018).

O trocador de calor casco e tubo da FIGURA 11 é utilizado para resfriar os gases de combustão, já que a espécie de microalga cultivada precisa de temperatura controlada no meio como parâmetro para seu crescimento. O trocador de calor é formado por dois tubos de aço um tubo interno o qual passam os gases de combustão e no exterior tem uma tubulação com água para ao resfriamento. O material dos tubos é de aço. Os fluidos têm uma única passagem em contracorrente sem contato direto.

FIGURA 12– COLUNA DE FIXAÇÃO



FONTE: a autora (2018)

O fixador de emissões mostrado na FIGURA 12 é composto de uma coluna em forma de cilindro construída de aço inoxidável de 9 m de altura e 0,384 m de diâmetro. O interior do cilindro está dividido por 18 semicírculos de aço. Dentro da coluna circula o cultivo de microalgas (com um fluxo de $2910 \pm 225,4 \text{ L.h}^{-1}$) e os gases de combustão (com um fluxo de $504000 \pm 15120 \text{ L.h}^{-1}$), direcionados em contracorrente. O choque de moléculas

entre os dois fluidos em fase gasosa e líquida permite a dissolução das emissões do motor diminuindo-as na saída da coluna.

Os dados experimentais das concentrações dos gases são obtidos com o analisador de gases testo 350® (Testo SE & Co. KGaA, 2016) (calibração mostrada no APÊNDICE B). Este analisador consta de uma unidade de controle para registro de dados e para facilitar o controle. A outra parte que o analisador possui é a caixa analisadora equipada com seis sensores para medir diferentes gases, sendo CO₂ e O₂ medidos por sensor infravermelho e os outros gases por sensores eletroquímicos. Esta medição é feita em um tempo de reação aproximadamente máximo de 40 s, com uma faixa de medição em porcentagem para os sensores infravermelho e o restante em ppm. Os dados técnicos dos sensores dos gases de combustão medidos para avaliação deste trabalho são mostrados na TABELA 6.

TABELA 6 – DADOS TÉCNICOS DOS SENSORES DE TESTO350

Gás medido	Faixa de medição	Exatidão
CO ₂	0 a +50 vol.%	±0,3 vol.% + 1 % do vm (0 a 25 vol.%)
SO ₂	0 a +5000 ppm	±0,5 vol.% + 1,5 % do vm (25 a 50 vol.%)
		±5 % do vm (+100 a +2000 ppm)
NO ₂	0 a +500 ppm	±10 % do vm (+2001 a +5000 ppm)
		±5 ppm (0 a +99 ppm)
		±5 % do vm (+100 a +500 ppm)
		±5 ppm (0 a +9,99 ppm)

FONTE: Testo (2016).

A velocidade dos gases é medida com o anemômetro ICEL AN-3030 o qual trabalha com a especificação técnica de escala de velocidade de 1,00 - 25,00 m.s⁻¹ com uma exatidão de ± 3 % + 0,20 (ICEL, 2016).

A medição da temperatura é coletada com um termistor NTFC onde os dados da resistência foram medidos com o multímetro BK® 2703^a, estes dados são interpretados para temperatura através da equação de Steinhart & Hart:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} (\ln R_s) + C [\ln(R_s)]^3 \quad (59)$$

onde T é a temperatura procurada, Rs a resistência medida, α recebe o valor de 803,6 e β recebe o valor de 3666,4. Estes valores são calibrados para o termistor e C pode-ser negligenciado por ser relativamente pequeno.

O crescimento da biomassa das microalgas foi analisada pela técnica de contagem de células em uma câmara de Neubauer em microscópio óptico com aumento de 400 vezes. Além da contagem, a concentração foi corroborada com a pesagem da biomassa seca em cada dia do cultivo por meio de método gravimétrico. Para a pesagem da biomassa seca foi colocado 10 mL de cultivo numa membrana filtrante de microfibras de vidro, a qual possui porosidade de 45 μm de diâmetro. Tal microfibras é previamente e posteriormente secada na estufa a 60° C por 24 h. Ao a pesagem é realizada em uma balança de precisão. As análises para determinação de concentração da biomassa no cultivo são realizadas em cada cultivo do NPDEAS.

3.4 ANÁLISE DE INCERTEZA

A média de todos dados experimentais foram coletados em triplicata e o limite de precisão foi calculado através do dobro do desvio padrão com um intervalo de grau de confiança de 95 %. Portanto a análise de incerteza foi calculada pela equação estimada pela Associação Americana de Engenheiros Mecânicos (KIM et al., 1993):

$$U_f = \sqrt{P_f^2 + B_f^2} \quad \text{ou} \quad \frac{U_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{P_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{B_f}{f}\right)^2} \quad (60)$$

onde, B_f é o limite de polarização da quantidade e P_f o limite de precisão. Portanto, U_f é a incerteza das medições da quantidade, f sendo a representação do parâmetro de medições: temperatura ou a concentração de massa de todos os componentes avaliados.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo contém os resultados do ajuste do modelo matemático apresentado no capítulo 3.1.1 sobre a simulação da temperatura dos gases de combustão no trocador de calor casco tubo. Além disso, é apresentada uma análise paramétrica do sistema de transferência de massa dos gases de combustão para o cultivo de microalgas na coluna de fixação, assim como a análise paramétrica do crescimento das microalgas influenciadas por CO₂, NO₂ e SO₂, visando o melhor aproveitamento. Ao final, é apresentada a modelagem matemática do capítulo 3.1.2 e 3.1.3 da transferência de massa na coluna e no FBR, respectivamente, comparando estes com os dados experimentais da medição de gases de combustão na entrada e saída da coluna de fixação, além do aumento da biomassa da microalga.

4.1 SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO: AJUSTE E PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA

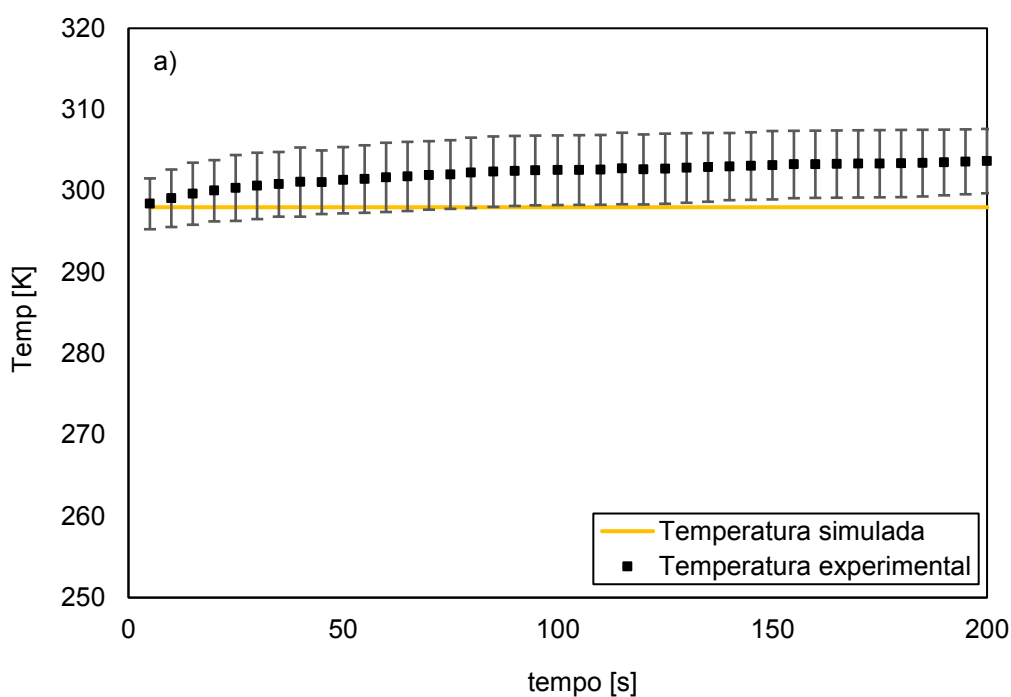
4.1.1 Temperatura de gases de combustão no cultivo de microalgas.

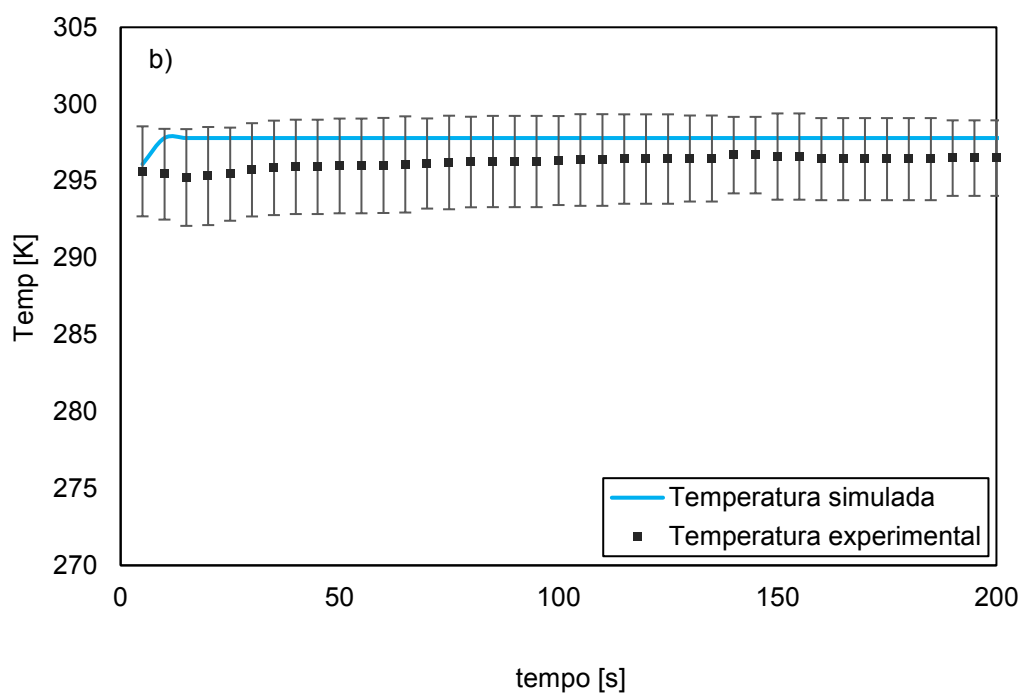
Para ajuste da modelagem matemática do resfriamento de gases, os dados da simulação foram comparados com um conjunto de dados experimentais das temperaturas de saída do gás e da água no trocador de calor, mostrado na FIGURA 13 a) e b), respectivamente. Nota-se que para o gás, os valores experimentais estabilizam em 100 segundos com uma temperatura média de 303 K e a simulação se estabiliza linearmente a temperatura ambiente, a parte simulada tem um desvio de 1,67 % a menos da parte experimental. A temperatura da água na saída tem média experimental 298,15 K e na simulação se estabiliza em 296 K com um desvio de 0,84 % a mais da temperatura experimental.

A simulação foi feita inicialmente com 5 EVi e posteriormente foi simulada para 10 EVi e 20 EVi (FIGURA 14), percebendo-se um comportamento similar nos três casos. A convergência da temperatura nos refinamentos é calculada da norma euclidiana na Eq. (58). Entre EV5 e EV10, a convergência foi menor do que 0,01 e menor com um maior refinamento de 10 e 20 EV.

Ao longo da última década, pesquisas de laboratório envolvendo o uso de cultivos de microalgas para tratamento de gases de combustão tiveram um crescimento significativo. No entanto, para aplicações de campo, os gases de combustão derivados de atividades industriais devem ser resfriados antes de alimentar os cultivos de microalgas para evitar perda de células. Usando o MEV foi apresentada a modelagem e simulação de um trocador de calor de casco e tubo de passagem única para refrigeração de gases de exaustão de um motor gerador diesel. Os resultados experimentais e os dados obtidos a partir do modelo mostraram valores aproximados. Para a temperatura dos gases de combustão, a diferença entre os valores experimentais e os obtidos por modelagem foi de 1,67 %, enquanto a diferença para a temperatura da água saindo do permutador de calor foi de 0,84 %. A modelagem e a simulação também mostraram que o comprimento longitudinal do trocador de calor poderia ser 50 % menor, o que implicaria em economia de custos durante a fabricação. O tempo necessário para refrigerar os gases de combustão de 100 °C até a temperatura ambiente de 30 °C foram de aproximadamente 200 segundos.

FIGURA 13–TEMPERATURA DO GÁS E DA ÁGUA SAINDO DO TROCADOR DE CALOR

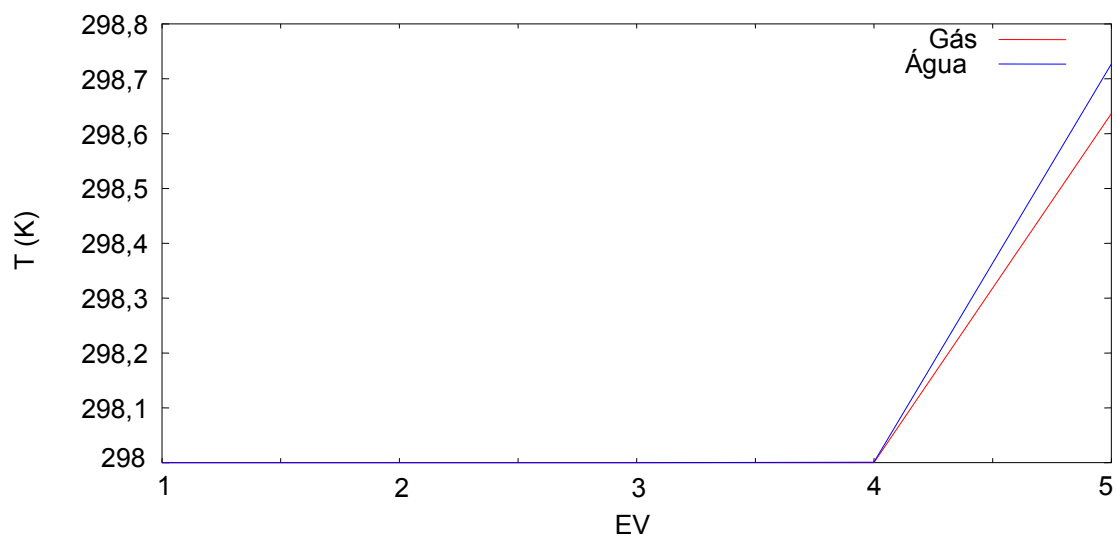


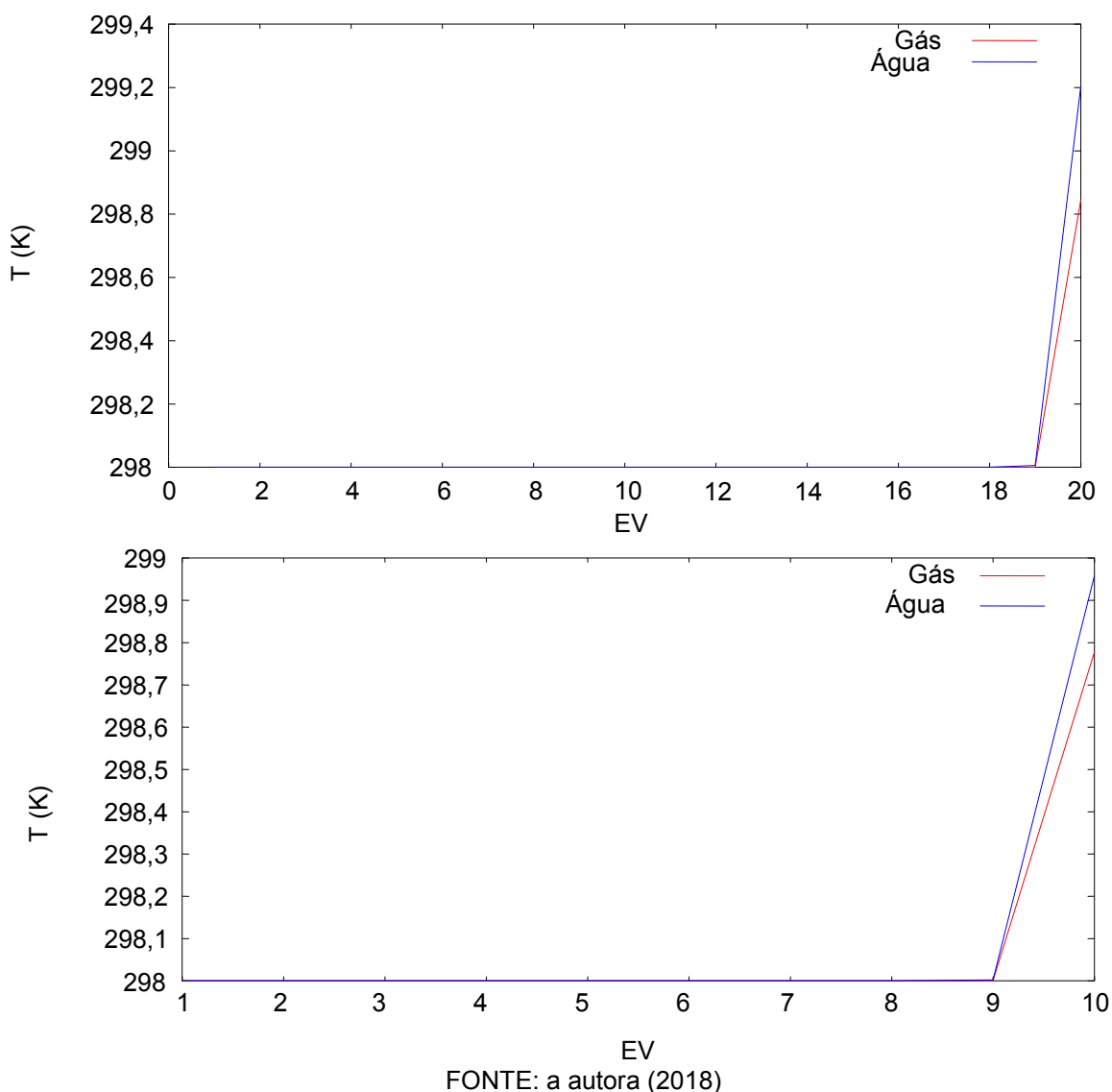


FONTE: a autora (2018)

LEGENDA: a) Ajuste de temperatura de saída do gás no VC2
b) Ajuste de temperatura de saída da água no VC1

FIGURA 14 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO GÁS E DA ÁGUA EM EV





4.1.2 Parametrização do sistema de fixação de gases

A TABELA 5 mostra os resultados da simulação para uma análise paramétrica da vazão de gás ($Q_{\text{gás}}$) de entrada na coluna de fixação que afetam a diluição de CO_2 , NO_2 e SO_2 no meio de cultivo, juntamente como o crescimento da biomassa de microalgas. A análise é realizada para 88 horas, que representam 11 dias de 8 horas de crescimento de microalgas. Para um caudal de $35000 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, o crescimento de biomassa de microalgas (X) foi $0,56 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ resultando maior crescimento que com outros caudais, além de ajustar-se aos dados obtidos experimentalmente e ter crescimento de biomassa (microalga da mesma espécie) (HE et al., 2013; GARCÍA-CUBERO et al., 2017). A porcentagem de diluição na

simulação varia de acordo com o gás, sendo mais solúveis com caudais de gás de combustão mais baixos.

TABELA 7 – PARAMETRIZAÇÃO DO CAUDAL DE GASES COLOCADOS NA COLUNA DE FIXAÇÃO COM MICROALGAS

$Q_{\text{gás}} \text{ (L.h}^{-1}\text{)}$		4000	30000	35000	36250	40000
CO₂ gás (mol.L⁻¹)	Entrada	4,10E-02	4,10E-02	4,10E-02	4,10E-02	4,10E-02
	Saída	1,46E-02	3,49E-02	3,57E-02	3,59E-02	3,63E-02
Diluição de gás (%)		64,39	14,74	12,82	12,41	11,33
NO₂ gás (mol.L⁻¹)	Entrada	2,25E-03	2,25E-03	2,25E-03	2,25E-03	2,25E-03
	Saída	7,33E-04	1,85E-03	1,90E-03	1,91E-03	1,93E-03
Diluição de gás (%)		67,43	17,70	15,71	15,29	14,17
SO₂ gás (mol.L⁻¹)	Entrada	1,57E-04	1,57E-04	1,57E-04	1,57E-04	1,57E-04
	Saída	6,89E-05	1,41E-04	1,43E-04	1,44E-04	1,45E-04
Diluição de gás (%)		56,12	10,25	8,64	8,30	7,40
X (g.L⁻¹)		0,15	0,15	0,56	0,15	0,05

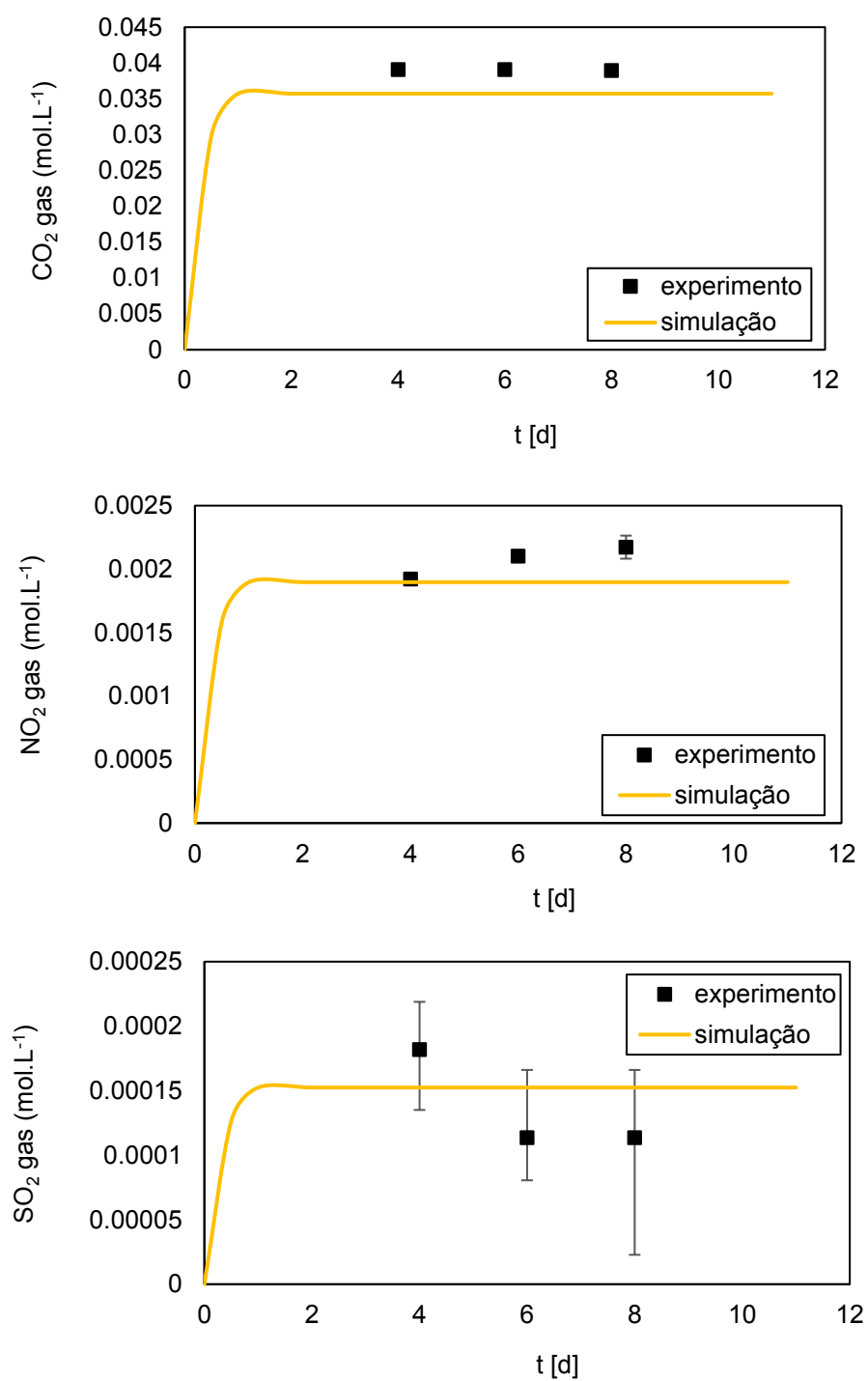
FONTE: a autora (2018)

4.1.3 Transferência de massa dos gases de combustão e o cultivo de microalgas.

O modelo matemático de transferência de massa tem a capacidade de prever a captura de gases de combustão pelas microalgas e o crescimento de biomassa cultivada sob influência destes gases. Dentro deste modelo foi possível analisar uma ampla gama de parâmetros, como o caudal de gás, taxa de concentração e tempo de exposição de gases de combustão para obter a concentração máxima de biomassa de microalgas em volumes específicos de cultivo. A avaliação para o cultivo de microalgas com 3000 L.h⁻¹ de caudal foi capaz de capturar uma maior porcentagem de gases de combustão enquanto que comum caudal de gás de 40000 L.h⁻¹ a diluição dos gases é muito baixa. O melhor crescimento de biomassa de microalgas nesta simulação foi encontrado para o fluxo de gás de entrada de 35000 L.h⁻¹. Além do mais, ao reduzir o fluxo de gás de entrada, o meio de cultura não possui nutrientes elementares para o metabolismo das microalgas e acaba sendo inibido; ou seja, o fluxo de gás superior a 35000 L.h⁻¹ inibe o crescimento da biomassa.

Para um caudal de 35000 L.h⁻¹ de gases de combustão, a composição (C) de CO₂, NO₂ e SO₂ nas saídas da purificação da coluna, apresentada na FIGURA 15, estes mostram em regime permanente a 1,27; 1,041 e 2 h, respectivamente.

FIGURA 15 – SAÍDA DOS GASES DE COMBUSTÃO NA COLUNA DE FIXAÇÃO

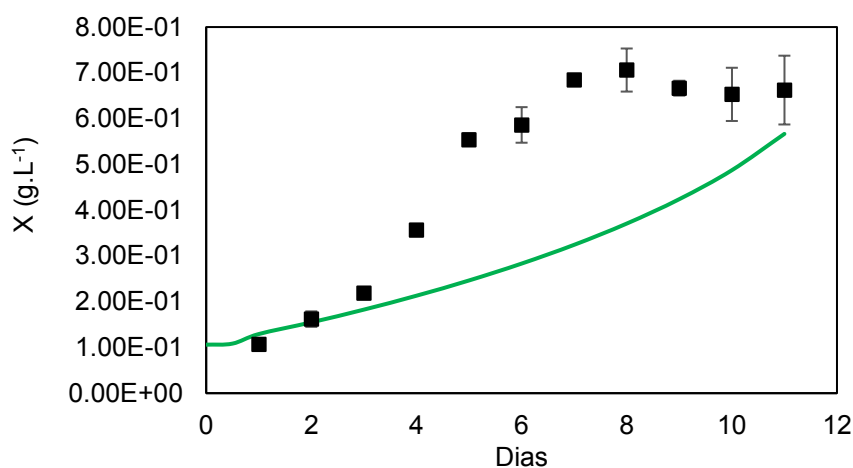


FONTE: a autora (2018)

4.2 CRESCIMENTO DA BIOMASSA DAS MICROALGAS

O comportamento da variação da biomassa de microalgas (X) durante o período de 11 dias é apresentado na FIGURA 16 em termos de simulação de dados experimentais. Esta biomassa foi exposta a um caudal de gás de combustão de 35000 L h^{-1} na entrada da coluna de fixação. A fase exponencial de crescimento do cultivo ocorre no 6º dia (24 h de crescimento) seguido pela fase estacionária. As hipóteses assumidas variam para cada tipo de espécie e de condições na qual foi submetido o experimento. Pelo qual a linha de simulação do crescimento pode ser ajustado com estes parâmetros.

FIGURA 16 – CRESCIMENTO DAS MICROALGAS NO PERÍODO DO CULTIVO



FONTE: a autora (2018)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

As conclusões desta dissertação seguindo os objetivos planteados estão resumidas a seguir:

- A modelagem matemática em regime transiente foi desenvolvida para o sistema de controle de temperatura como para a captura dos gases de combustão em um meio de cultivo de microalgas;

- b) Foi elaborada uma análise paramétrica determinando os impactos na resposta do sistema, identificando oportunidades para otimização termodinâmica;
- c) O processo experimental do sistema foi realizado no NPDEAS para um cultivo de microalgas em um período de 11 dias, sem chegar na fase de declínio;
- d) Foi realizado o ajuste experimental do modelo matemático para um conjunto de dados experimentais realizados.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um conjunto de dados tanto modelados matematicamente como experimentais afim de verificar possíveis soluções para melhorar um processo de captura de gases de combustão pelo cultivo de microalgas. Neste processo de fixação de gases são utilizados recursos renováveis (a biomassa de microalgas) com intuito de serem utilizadas em outros processos, tanto de produção de energia ou geração de outros produtos de valor comercial. Continuando o trabalho realizado e visando melhorias propõem-se as seguintes recomendações:

- Realizar o ajuste matemático para cultivos em escalas maiores.
- Realizar validação experimental do modelo com outras espécies de microalgas e em diferentes tipos de fotobiorreatores.
- Incluir na modelagem matemática a análise de outros gases presentes na combustão e que podem ser consumidos pelo metabolismo das microalgas.
- Realizar análise dos compostos diluídos na água do cultivo (bicarbonato, nitrato e sulfato) antes e depois de colocar gases para ajustar no modelo matemático e assim incluir o consumo destes nutrientes pela microalga.
- Ajustar a parametrização testando as diferentes vazões de gás no cultivo e o tempo de exposição para verificar a faixa máxima que este tipo de espécie de microalga pode suportar sem que ocorra perda de biomassa.

REFERÊNCIAS

ABDELAAL, M. M.; HEGAB, A. H. Combustion and emission characteristics of a natural gas-fueled diesel engine with EGR. **Energy conversion and management**, v. 64, p. 301-312, 2012. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412002415>>

AIBA, Shuichi. Growth kinetics of photosynthetic microorganisms. **Microbial reactions**, p. 85-156, 1982.

ANDREWS, John F. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 10, n. 6, p. 707-723, 1968.

ARAUJO, O. Q. F. et al. 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**, v. 102, n. 2, p. 425-435, 2009.

ASLAM, Ambreen et al. Selection and adaptation of microalgae to growth in 100% unfiltered coal-fired flue gas. **Bioresource Technology**, v. 233, p. 271-283, 2017.

BALDWIN, W. Clifton; SAUSER, Brian. Modeling the characteristics of system of systems. In: **System of Systems Engineering, SoSE 2009. IEEE International Conference on**. IEEE, p. 1-6, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5282345>>

Balmant, W. et al. Stoichiometric model of the cultivation of microalgae in industrial systems. **HNO**, v. 397, n. 439.23, p. 439-23, 2011.

Balmant, W. et al. Mathematical modeling of a column purification of waste incineration exhaust gases. **16° Brazilian congress of thermal science and engineering**, 1, 1 - 1, 2016.

BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. John Wiley & Sons, 2013.

BIRD, R. B.; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. Transport Phenomena. Second. **J. Wiley**, 2002.

BRITISH PETROLEUM. BP statistical review of world energy 2017. Disponível em: <<http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Acesso em: 04set, 2017.

BURNS, Douglas A. et al. Acid rain and its environmental effects: Recent scientific advances. **Atmospheric Environment**, v. 146, p. 1-4, 2016.

CHEN, Jie et al. Modeling, experiments and optimization of an on-pipe thermoelectric generator. **Energy Conversion and Management**, v. 122, p. 298-309, 2016.

CONCAS, Alessandro et al. Experimental analysis and novel modeling of semi-batch photobioreactors operated with *Chlorella vulgaris* and fed with 100 % (v/v) CO₂. **Chemical engineering journal**, v. 213, p. 203-213, 2012.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), **Resolução 436** 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>. Acesso em: 18 nov, 2017.

CORRÊA, Diego de Oliveira. **Desenvolvimento e caracterização do cultivo de microalgas em fotobiorreator alimentado por emissões gasosas de motores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de tecnologia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2015.

CORRÊA, D. O. et al. Enhanced biohydrogen production from microalgae by diesel engine hazardous emissions fixation. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017.

CUELLAR-BERMUDEZ, Sara P. et al. Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 53-65, 2015.

DILAY, Emerson et al. A volume element model (VEM) for energy systems engineering. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 1, p. 46-74, 2015.

EDITORIAL. Journal of Heat Transfer Editorial Policy Statement on Numerical Accuracy. **ASME Journal of Heat Transfer**, v. 116, p. 797-798, 1994.

EPA 2017. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2015**. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. April 2017. EPA 430-P-17-001. Disponível em: <https://www.epa.gov/statelocalenergy/state-co2-emissions-fossil-fuel-combustion>. Acesso em: 18 nov, 2017.

EUROPEAN DIRECTIVE. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (Integrated Pollution Prevention and Control). **Official Journal of the European Union L**, v. 334, p. 17-119, 2010. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:en:PDF>. Acesso em: 18 dez, 2017.

EYNDE, Erik Van et al. Valorization of Flue gas by combining photocatalytic gas pretreatment with microalgae production. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 5, p. 2538-2545, 2016.

FERNÁNDEZ, I. et al. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. **Algal Research**, v. 17, p. 67-78, 2016.

FINGER, Gustavo Strauch Wilin. **Aumento de Biomassa de Microalgas Cultivadas em Fotobiorreatores pela Injeção de Emissões de Grupo Motogerador Diesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de tecnologia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2018.

GONZÁLEZ-LÓPEZ, C. V. et al. Development of a process for efficient use of CO₂ from flue gases in the production of photosynthetic microorganisms. **Biotechnology and bioengineering**, v. 109, n. 7, p. 1637-1650, 2012.

GARCÍA-CUBERO, Rafael; MORENO-FERNÁNDEZ, José; GARCÍA-GONZÁLEZ, Mercedes. Modelling growth and CO₂ fixation by *Scenedesmus vacuolatus* in continuous culture. **Algal Research**, v. 24, p. 333-339, 2017.

GRACIANO, Vilmar; VARGAS, Jose Viriato C.; ORDONEZ, Juan C. Modeling and simulation of diesel, biodiesel and biogas mixtures driven compression ignition internal combustion engines. **International Journal of Energy Research**, v. 40, n. 1, p. 100-111, 2016.

HAMED, Imen. The Evolution and Versatility of Microalgal Biotechnology: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 15, n. 6, p. 1104-1123, 2016.

HASAN, MM Faruque et al. Nationwide, regional, and statewide CO₂ capture, utilization, and sequestration supply chain network optimization. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 18, p. 7489-7506, 2014.

HE, Lian et al. Optimize flue gas settings to promote microalgae growth in photobioreactors via computer simulations. **Journal of visualized experiments: JoVE**, n. 80, 2013.

HEYWOOD, John B. et al. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: Mcgraw-hill, 1988.

HO, Shih-Hsin et al. Perspectives on engineering strategies for improving biofuel production from microalgae - a critical review. **Biotechnology advances**, v. 32, n. 8, p. 1448-1459, 2014.

HO, Shih-Hsin et al. Feasibility of CO₂ mitigation and carbohydrate production by microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N used for bioethanol fermentation under outdoor conditions: effects of seasonal changes. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 27, 2017.

HUANG, Guanhua et al. Current Techniques of Growing Algae Using Flue Gas from Exhaust Gas Industry: a Review. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 178, n. 6, p. 1220-1238, 2016.

ICEL. Manual de instruções do anemômetro modelo an-3030. Disponível em:<http://www.icel-manaus.com.br/produto_descricao.php?id=716>. Acesso em: 20 nov.2016.

JUDD, Simon et al. Algal remediation of CO₂ and nutrient discharges: A review. **Water research**, v. 87, p. 356-366, 2015.

KAO, Chien-Ya et al. Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp. **Bioresource technology**, v. 166, p. 485-493, 2014.

KIM, Jong H.; SIMON, Terrence W.; VISKANTA, Raymond. Editorial– Journal of heat transfer policy on reporting uncertainties in experimental measurements and results. **Journal of Heat Transfer**, v. 115, n. 1, p. 5-6, 1993.

KROUMOV, Alexander Dimitrov et al. A systems approach for CO₂ fixation from flue gas by microalgae - Theory review. **Process Biochemistry**, 2016.

LAUMB, J. D. et al. Economic and Market Analysis of CO₂ Utilization Technologies– Focus on CO₂ derived from North Dakota lignite. **Energy Procedia**, v. 37, p. 6987-6998, 2013.

MATA, Teresa M.; MARTINS, Antonio A.; CAETANO, Nidia S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

MARKANDYA, Anil; WILKINSON, Paul. Electricity generation and health. **The Lancet**, v. 370, n. 9591, p. 979-990, 2007.

MARTÍNEZ, Natalia et al. Obtaining biodiesel from microalgae oil using ultrasound-assisted in-situ alkaline transesterification. **Fuel**, v. 202, p. 512-519, 2017.

MARTINHO, L. C. S. et al. A single stage absorption refrigeration system dynamic mathematical modeling, adjustment and experimental validation. **International Journal of Refrigeration**, v. 68, p. 130-144, 2016.

MING, Tingzhen et al. Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 792-834, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Resenha energética Brasileira 2017. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0> >. Acesso em: 04set.2017.

MITCHELL, Mark J. et al. A model of carbon dioxide dissolution and mineral carbonation kinetics. In: **Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. The Royal Society, 2010. p. 1265-1290.

MORAN, MICHAEL J. ET AL. Fundamentals of engineering thermodynamics. John Wiley & Sons, 2010.

NAPAN, Katerine et al. Impact of heavy metals from flue gas integration with microalgae production. **Algal Research**, v. 8, p. 83-88, 2015.

NATIONS, United. **Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change 1998.**

Disponível em: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Acesso em: 18 nov, 2017.

NATIONS, United. **Paris Agreement 2015.** Disponível em: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php. Acesso em: 18 nov, 2017.

PACHAURI, RAJENDRA K. ET AL. Climate change 2014: synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2014.

PAVLIK, David et al. Microalgae cultivation for carbon dioxide sequestration and protein production using a high-efficiency photobioreactor system. **Algal Research**, v. 25, p. 413-420, 2017.

PAVLOVA, V. et al. Effect of temperature and light intensity on the growth, chlorophyll a concentration and microcystin production by *Microcystis aeruginosa*. **General and Applied Plant Physiology**, v. 36, n. 3-4, p. 148-158, 2010.

PECCIA, Jordan et al. Nitrogen supply is an important driver of sustainable microalgae biofuel production. **Trends in biotechnology**, v. 31, n. 3, p. 134-138, 2013.

PIRES, J. C. M. et al. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and biorefinery concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3043-3053, 2012.

PIRES, J. C. M. et al. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 248-254, 2017.

PRADHAN, Lopamudra et al. Biosequestration of CO₂ using power plant algae (Rhizocloniumhieroglyphicum JUCHE2) in a Flat Plate Photobio-Bubble-Reactor- Experimental and modeling. **Chemical Engineering Journal**, v. 275, p. 381-390, 2015.

PRUVOST, J. et al. Investigation of biomass and lipids production with Neochlorisoleoabundans in photobioreactor. **Bioresource technology**, v. 100, n. 23, p. 5988-5995, 2009.

PRUVOST, J. et al. Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: Biomass production modelling and energetic analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 850-861, 2016.

RIBEIRO, R. L. L. et al. The experimental validation of a large-scale compact tubular microalgae photobioreactor model. **International Journal of Energy Research**, 2017.

RIZZA, Lara Sanchez et al. Bioprospecting for native microalgae as an alternative source of sugars for the production of bioethanol. **Algal Research**, v. 22, p. 140-147, 2017.

RONDA, Srinivasa Reddy et al. A growth inhibitory model with SO_x influenced effective growth rate for estimation of algal biomass concentration under flue gas atmosphere. **Bioresource technology**, v. 152, p. 283-291, 2014.

SADEGHIZADEH, Aziz et al. CO₂ capture from air by Chlorella vulgaris microalgae in an airlift photobioreactor. **Bioresource technology**, v. 243, p. 441-447, 2017.

SANTOS, Beatriz. **Estratégias para aumentar a produtividade de biomassa de microalgas com carbono orgânico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de tecnologia, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2016.

SABER, Mohammad; NAKHSHINIEV, Bakhtiyor; YOSHIKAWA, Kunio. A review of production and upgrading of algal bio-oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 918-930, 2016.

SAMORÌ, Giulia et al. Growth and nitrogen removal capacity of *Desmodesmus communis* and of a natural microalgae consortium in a batch culture system in view of urban wastewater treatment: part I. **Water research**, v. 47, n. 2, p. 791-801, 2013.

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**, v. 35, n. 4, p. 291-311, 2011.

SDMO-MAQUIGERAL. Catalogo do produto: MAQ 12 W. Disponível em: <<http://br.sdmo.com/Content/Subsidiaries/BR/Boletins/12W.pdf>>. Acesso em: 15 nov.2016.

SENGMEE, Dennapa et al. Biophotolysis-based hydrogen and lipid production by oleaginous microalgae using crude glycerol as exogenous carbon source. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 4, p. 1970-1976, 2017.

SHAPIRO, Benjamin. 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**, v. 26, n. 1, p. 165-172, 2003.

SINGH, Shweta; ELUMALAI, Suresh Pandian; PAL, Asim Kumar. Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study. **Science of The Total Environment**, v. 563, p. 293-301, 2016.

SONGOLZADEH, Mohammad et al. Carbon dioxide separation from flue gases: a technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

SUTTELL, Nick G.; VARGAS, Jose Viriato Coelho; ORDONEZ, Juan Carlos. Transient Thermal Analysis of HTS DC Cables Cooled With Gaseous Helium Using a Volume Element Method Transactions on Applied Superconductivity. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 27, n. 4, p. 1-5, 2017.

TESTO. Catalogo do produto: Flue gas analyzer for industry. Disponível em: <<https://media.testo.com/media/d2/a1/e34d86293cb1/testo-350-Data-sheet.pdf>>. Acesso em: 13 nov.2016.

THIANSATHIT, Worrarat et al. The kinetics of *Scenedesmus obliquus* microalgae growth utilizing carbon dioxide gas from biogas. **Biomass and bioenergy**, v. 76, p. 79-85, 2015.

VALIORGUE, Pierre et al. CO₂ mass transfer and conversion to biomass in a horizontal gas–liquid photobioreactor. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 92, n. 10, p. 1891-1897, 2014.

VAN DEN HENDE, SOFIE; VERVAEREN, HAN; BOON, NICO. Flue gas compounds and microalgae: (Bio-) chemical interactions leading to biotechnological opportunities. **Biotechnology advances**, v. 30, n. 6, p. 1405-1424, 2012.

VARGAS, J. et al. A numerical model to predict the thermal and psychrometric response of electronic packages. **Journal of Electronic Packaging**, v. 123, n. 3, p. 200-210, 2001.

VARGAS, J. **Modelagem e simulação de processo de geração de hidrogênio via cultivo de microalgas em fotobiorreatores compactos**. 102 f. Monografia (Especialização em Ciências Biológicas) - sector de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2013.

VARGAS, Jose Viriato Coelho et al. **Enhanced Photobioreactor System**. U.S. Patent Application n. 15/362,182, 16 mar. 2017.

VARGAS, J.; ARAKI, L. **Cálculo numérico aplicado**. BARRUERI, SP:MANOLE, 2017

WANG, XINZHU ET AL. A study on heat transfer enhancement in the radial direction of gas flow for thermoelectric power generation. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 176-183, 2016.

WEI, Lijiang; GENG, Peng. A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. **Fuel Processing Technology**, v. 142, p. 264-278, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease 2016. Disponível em: <<http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/250141/1/9789241511353-eng.pdf>>. Acesso em 20 out. 2016.

YANG, Sam et al. Volume element model mesh generation strategy and its application in ship thermal analysis. **Advances in Engineering Software**, v. 90, p. 107-118, 2015.

YAZAWA, Kazuaki; SHAKOURI, Ali. Cost-efficiency trade-off and the design of thermoelectric power generators. **ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY**, V. 45, N. 17, P. 7548-7553, 2011.

YEN, HONG-WEI ET AL. CO₂, NO_x and SO_x removal from flue gas via microalgae cultivation: A critical review. **Biotechnology journal**, v. 10, n. 6, p. 829-839, 2015.

YUN, Hyun-Shik et al. Microalga, *Acutodesmus obliquus* KGE 30 as a potential candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 17, p. 17831-17839, 2016.

ZAYADAN, Bolatkhan K. et al. Waste-free technology of wastewater treatment to obtain microalgal biomass for biodiesel production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 12, p. 8586-8591, 2017.

GLOSSÁRIO

Coluna de fixação – Coluna usada para fixar gases de combustão por um cultivo de microalgas, sendo os fluidos em contra fluxo.

Fotobiorreator – Equipamento empregado para cultivar microalgas fotoautotróficas.

Método de Elemento de Volume– Método matemático baseado em divisão tridimensional de elementos de volume aplicado para otimizar de um sistema físico.

Motogerador – Motor de combustão interna aproveitado para geração de energia elétrica.

Scenedesmus obliquus – Nome científico da espécie de microalga usada no experimento deste trabalho.

Trocador de calor casco tubo – Equipamento aplicado para regular a temperatura de entrada dos gases de combustão na coluna de fixação, já que a temperatura é um parâmetro de crescimento da microalga.

**APÊNDICE A–TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR EM CURITIBA NO
PERÍODO DO EXPERIMENTO**


Estação: Curitiba, Código ANA: 2549101, Município: Curitiba, Intervalo:
05/11/2017 a 16/11/2017 Data de geração: 11/12/2017.

Data Dia/mês/ano	Intensidade Solar (W.m ⁻²)	Temperatura	Temperatura	Temperatura
		Máxima	Mínima	Média
		(°C)		
06/11/2017	123,737	16,4	11,2	13,803
07/11/2017	365,780	20,7	10,5	14,892
08/11/2017	142,624	18,2	12,1	14,938
09/11/2017	308,223	26,0	14,3	18,705
10/11/2017	257,689	26,5	15,1	18,535
11/11/2017	485,662	24,8	13,4	18,344
12/11/2017	594,468	26,9	13,1	19,493
13/11/2017	585,847	28,0	9,6	18,309
14/11/2017	584,468	24,9	10,1	17,890
15/11/2017	561,313	30,3	10,9	21,460
16/11/2017	487,617	31,6	17,0	24,359
17/11/2017	379,362	27,5	15,7	20,561

FONTE: SIMEPAR (2017)

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO ANALISADOR TESTO 350

Serviços Industriais

We measure it. 

Página 1 de 2

Certificado de Calibração

N° 48611/1

Dados do Cliente

Contratante: JOSÉ VIRIATO COELHO VARGAS CNPq
Endereço: RUA SINKE FERREIRA, 705 D - JD DAS AMÉRICAS - CURITIBA - PR
Cliente: O mesmo

Dados do Instrumento

Instrumento:	Analizador de gases	Faixa(s) de Medição:	Oxigênio - 0..25 %mol/mol
Marca:	Testo		Monóxido de Carbono - 0..10000 ppm
Modelo:	350		Dióxido de Carbono - 0..500000 ppm
Identificação Cliente:	Não Consta		Dióxido de Enxofre - 0..5000 ppm
Identificação Fabricante:	0632 3510		Dióxido de Nitrogênio - 0..500 ppm
Número de Série:	60552789		Sulfeto de Hidrogênio - 0..300 ppm
Id. Sensor/Sonda:	Não Consta		

Dados da Calibração

DATA DA CALIBRAÇÃO: 27/04/16 DATA DE EMISSÃO: 28/04/16
ORDEM DE SERVIÇO Nº: 48611 CONDIÇÕES AMBIENTAIS: Temperatura: 23 ± 5°C e Umidade: 45 à 70%ur.
LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório da Testo

Dados do Procedimento

O analisador foi calibrado realizando seis leituras em cada gás de referência e expressa a média como resultado de cada ponto.
Procedimento interno: PO - 5.4-003 revisão 07

Dados dos Padrões

Código	Descrição	Data Calibração	N° do Certificado	Laboratório	Validade	Rastreabilidade
Padrão 12 - O2	Gás referencia O2 10,0 %	15/12/15	41413575	White Martins	dez-20	RBC
Padrão 12 - CO	Gás referencia CO 1000 ppm	15/12/15	41413575	White Martins	dez-20	RBC
Padrão 12 - CO2	Gás referencia CO2 5000 ppm	15/12/15	41413575	White Martins	dez-20	RBC
Padrão 15 - SO2	Gás referencia SO2 1000 ppm	02/09/15	41416359	White Martins	jun-16	RBC
Padrão 16 - NO2	Gás referência NO2 100 ppm	16/05/15	41324178	White Martins	mai-16	RBC
Padrão 15 - H2S	Gás referência H2S 200 ppm	02/09/15	41416359	White Martins	jun-16	RBC

Testo do Brasil - Instrumentos de Medição Ltda.

Avenida Engenheiro Artur Segurado, 615 - Jardim Leonor - CEP: 13.041-070 - Campinas - SP - Brasil
Fone: 19 3731-5816 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - www.testo.com.br

Certificado de Calibração**N° 48611/1****Resultados**

Tipo do gás: Oxigênio						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
10,03	10,17	0,14	0,20	2,00	∞	%mol/mol

Tipo do gás: Monóxido de Carbono						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
1,022	1,021	-1	18	2,00	∞	μmol/mol

Tipo do gás: Dióxido de Carbono						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
5,016	4,600	-416	75	2,00	∞	μmol/mol

Tipo do gás: Dióxido de Enxofre						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
1,020	1,010	-10	12	2,00	∞	μmol/mol


Tipo do gás: Dióxido de Nitrogênio						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
96,1	93,9	-2,2	6,0	2,00	∞	μmol/mol

Tipo do gás: Sulfeto de Hidrogênio						
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE LEITURA
			VALOR	FATOR K	VEFF	
201,2	190,1	-11,1	8,0	2,00	∞	μmol/mol

Observações

- 1 - Erro encontrado = Leitura no instrumento - valor de referência e Veff = Graus de liberdade efetivos.
- 2 - Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica.
- 3 - A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência K (descrito acima), o qual para uma distribuição t-student com Veff (descrito acima) graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Se Veff = ∞, então a distribuição é normal e K = 2.
- 4 - A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- 5 - O presente certificado refere-se exclusivamente ao instrumento calibrado sendo proibida a reprodução parcial deste certificado.
- 6 - Conversão de unidades: 1 μmol/mol = 1 ppm = 0,0001% mol/mol.
- 7 - As unidades de leitura descritas acima referem-se somente aos respectivos valores de referência, leitura no instrumento, desvio encontrado e valor da incerteza de medição. Os valores do valor K e Veff são adimensionais.

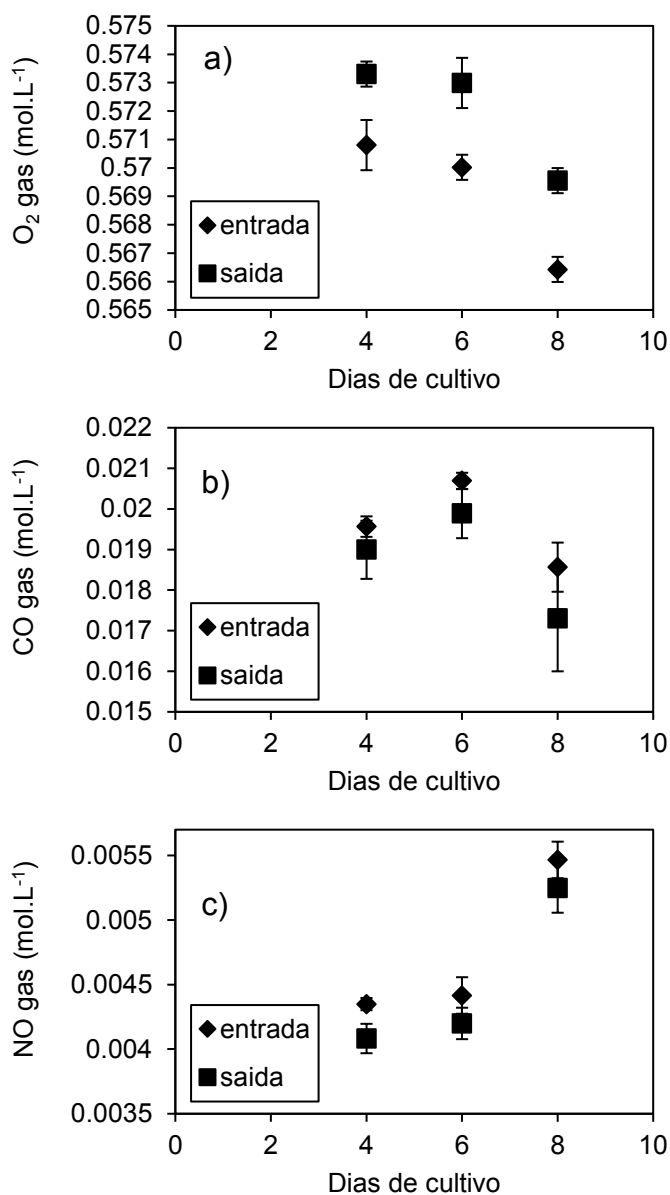
Técnico Executante: Guilherme Henrique Teixeira



 Signatário Autorizado
 Cássio Pereira Costa
Testo do Brasil - Instrumentos de Medição Ltda.
 Avenida Engenheiro Artur Segurado, 615 - Jardim Leonor - CEP: 13.041-070 - Campinas - SP - Brasil
 Fone: 19 3731-5816 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - www.testo.com.br

ANEXO A–MEDIÇÃO DE O₂, CO E NO (PROVENIENTES DE GASES DE EXAUSTÃO) NA ENTRADA E SAÍDA DA COLUNA DE FIXAÇÃO

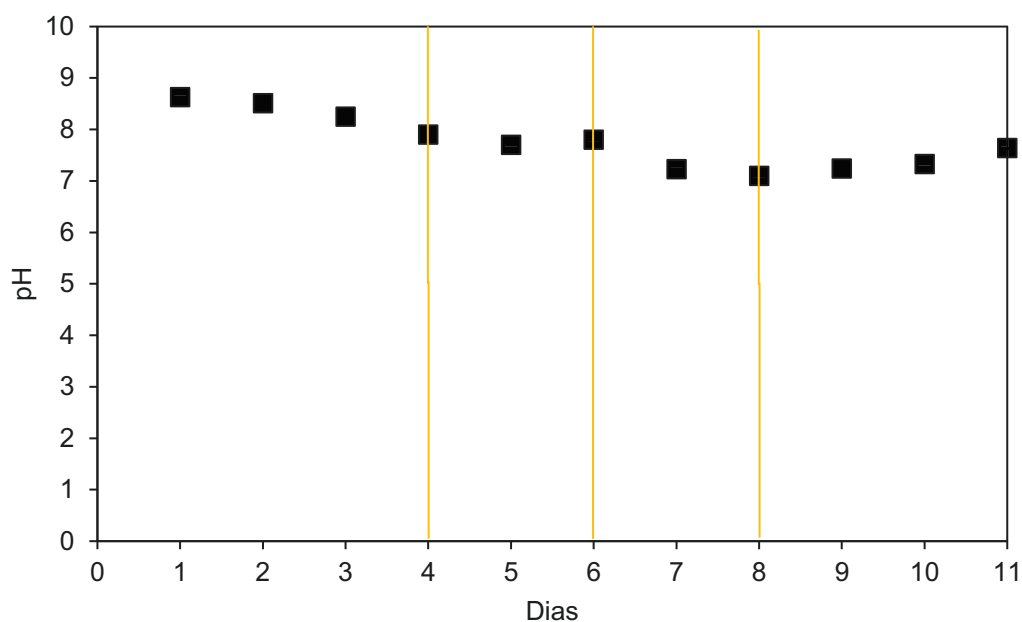
As figuras à baixo representam as medições de outros compostos do gás de combustão que foram medidos no experimento e não foram avaliados na simulação. Na figura a) pode-se verificar que o O₂ tem maiores concentração na saída da coluna de fixação, já que as microalgas estão produzindo este composto. No entanto as figuras b) e c) mostram que os gases NO e CO estão sendo consumidos pelas microalgas.



FONTE: a autora (2018)

ANEXO B–pH DO CULTIVO

A análise do pH foi realizada todos os dias do cultivo para verificar o efeito dos gases de combustão no meio. Estas análises foram realizadas com pHmetro marca TECNOPON, modelo mPA-210 o qual tem uma precisão de $\pm 0,005$ pH. A figura a seguir exibe a redução do pH a partir do dia quatro, o qual foi colocado o gás de combustão; no entanto o cultivo manteve o pH dentro do intervalo que o meio de cultivo precisa para que as microalgas cresçam.



FONTE: a autora (2018)

LEGENDA: — Gás de combustão