

ÊNIO CARSTENS TELLES

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE SISTEMA MULTIGERADOR
(CALOR, ELETRICIDADE E CO₂) PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
DE MICROALGAS EM MINIFOTOBIOREATOR**

**Curitiba
2011**

ÊNIO CARSTENS TELLES

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE SISTEMA MULTIGERADOR
(CALOR, ELETRICIDADE E CO₂) PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
DE MICROALGAS EM MINIFOTOBIOREATOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia

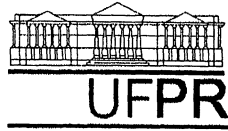
Área de concentração:

Engenharia e Ciência dos Materiais

Orientador:

Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas

**Curitiba
2011**




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


RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos trinta dias do mês de agosto de 2011, na Sala NPDAS - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima décima defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: José Viriato Coelho Vargas (UFPR), André Bellin Mariano (UFPR), Luiz Alberto Oliveira Rocha (UFRGS). Às 14:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **ENIO CARSTENS TELLES** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**DESENVOLVIMENTO E ANALISE DE SISTEMA MULTIGERADOR (CALOR, ELETRICIDADE, CO2) PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM MINIFOTOBIOREATOR**”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

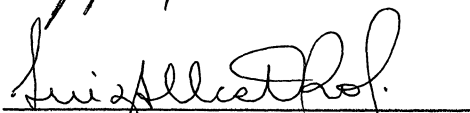
Curitiba, 30 de agosto de 2011.



Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas
Orientador



Prof. Dr. André Bellin Mariano
Examinador



Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Examinador

Dedico este estudo a meu filho, João Thomas, que sempre me proporcionou alegrias e motivação para prosseguir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador, Prof. Dr. **José Viriato Coelho Vargas**, pelo incentivo, orientação e exemplo, os quais foram indispensáveis para a conclusão do trabalho apresentado.

Ao Prof. Dr. **André Bellin Mariano**, pelo apoio e contribuição no desenvolvimento de meus estudos de mestrado.

Ao amigo e colega Eng. MsC. **Alexandre Stall**, que me acompanhou durante o processo de realização do presente trabalho e prestou ajuda essencial para sua conclusão.

Ao MsC. **Wellington Balmant**, pelo auxílio e amizade.

Ao Prof. Dr. **Marcos Carvalho Campos**, pelo apoio e conselhos na realização de minhas atividades.

A **todos os integrantes do Grupo do NPDEAS-UFPR** pelo apoio, incentivo e ajuda na realização das tarefas relacionadas a minhas atividades.

À **minha família**, pela ajuda, apoio e compreensão em todos os momentos.

"O passado serve para mostrar nossas
falhas e dar indicações para o
progresso futuro"
(Henry Ford)

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	01
1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO PROPOSTO.....	01
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	04
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
2.1 TRIGERAÇÃO.....	06
2.1.1 Classificação Dos Sistemas De Trigeração.....	06
2.1.2 Aplicações Atuais De Sistemas De Trigeração.....	09
2.1.2.1 Estudos Com Análise Energética.....	09
2.1.2.2 Estudos Com Análise Econômica.....	11
2.1.2.3 Estudos Com Análise Ambiental.....	12
2.1.2.4 Estudos Com Análise Exergética.....	14
2.2. CULTIVO DE MICROALGAS.....	15
2.2.1 Sistemas De Cultivo De Microalgas.....	20
2.3.OBJETIVOS.....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. GRUPO MOTO-GERADOR.....	27
3.1.1 Gases Emitidos Por Um Motor Diesel.....	27
3.1.2 Motor Utilizado.....	29
3.1.3 Gerador Elétrico.....	31
3.1.4 Grupo Gerador Battistela/Maquigeral 12w6a.....	32
3.2 TROCADOR DE CALOR.....	33
3.3 MINIFOTOBIOREATOR.....	35
3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS.....	41
3.5 ANÁLISE TERMODINÂMICA.....	46
3.6 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	48
3.7 ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO CULTIVO DE MICROALGAS.....	51
4.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA DO SISTEMA MULTIGERADOR.....	56
5 CONCLUSÕES.....	61

5.1.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO NPDEAS/UFPR.....	3
FIGURA 2.1 CICLO DE VIDA PADRÃO DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS.....	16
FIGURA 2.2 PERFIL DE ILUMINAÇÃO NA TUBULAÇÃO DE UM FOTOBIORREATOR (MOLINA GRIMA <i>et al.</i> , 2001).....	17
FIGURA 2.3 CRESCIMENTO ESPECÍFICO DAS MICROALGAS COMO FUNÇÃO DA INTENSIDADE DA EXPOSIÇÃO À LUZ SOLAR.....	18
FIGURA 2.4 DIAGRAMA DE UMA LAGOA DE CULTIVO DO TIPO PISTA DE CORRIDA (A) E DE UM FOTOBIORREATOR TUBULAR (B).....	21
FIGURA 2.5 SISTEMAS INTERNOS DE CULTIVO DE ALGAS (SCHENK <i>et al.</i> , 2008).....	21
FIGURA 2.6 ORIENTAÇÃO DO COLETOR SOLAR (Modificado de CHISTI <i>et al.</i> , 2007) NPDEAS/UFPR.....	22
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DO GRUPO MULTIGERADOR.....	26
FIGURA 3.2 GRUPO MOTO-GERADOR BATTISTELLA.....	27
FIGURA 3.3 MOTOR DIESEL MWM 229.....	29
FIGURA 3.4 ALTERNADOR WEG LINHA G.....	31
FIGURA 3.5 GRUPO GERADOR INSTALADO.....	32
FIGURA 3.6 MÓDULO USCAMAQ-21.....	33
FIGURA 3.7 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR.....	33
FIGURA 3.8 TROCADOR DE CALOR APEMA MODELO TST 175-5-1-A.....	35
FIGURA 3.9 MINIFOTOBIORREATOR.....	36
FIGURA 3.10 FOTOBIORREATOR NPDEAS.....	37
FIGURA 3.11 DESENHO ESQUEMÁTICO DA TUBULAÇÃO DE PVC TRANSPARENTE.....	37
FIGURA 3.12 BOMBA CENTRÍFUGA DANCOR MODELO CAM-W4C.....	38

FIGURA 3.13 COMPRESSOR DE AR INGERSOLL-RAND MODELO 15T2.....	39
FIGURA 3.14 COMPRESSOR DE AR SCHULZ MSV 40.....	39
FIGURA 3.15 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO UTILIZADA.....	40
FIGURA 3.16 REPRESENTAÇÃO DE UM MÓDULO GASSER/DEGASSER.....	40
FIGURA 3.18 VÁLVULA DIRECIONAL.....	41
FIGURA 3.19 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	42
FIGURA 3.20 DIMENSÕES DO TERMISTOR 44031RC.....	43
FIGURA 3.21 MEDIDOR DE VAZÃO OMEGA FL-6315ABR.....	44
FIGURA 3.22 pHMETRO DIGITAL PG1800.....	45
FIGURA 3.23 ESPECTROFOTÔMETRO UV-1800.....	46
FIGURA 3.24 DIAGRAMA DO SISTEMA MULTIGERADOR.....	48
FIGURA 4.1 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA <i>SCENEDESMUS SP.</i> COM A ADIÇÃO DE AR EM GALÃO.....	51
FIGURA 4.2 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA <i>SCENEDESMUS SP.</i> COM A ADIÇÃO DAS EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM GALÃO.....	52
FIGURA 4.3 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA MISTURA DE ALGAS COM A ADIÇÃO DE AR EM GALÃO.....	53
FIGURA 4.4 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA MISTURA DE ALGAS COM A ADIÇÃO DE EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM GALÃO.....	53
FIGURA 4.5 CURVA DE ABSORBÂNCIA DAS ALGAS COM A ADIÇÃO DE AR EM MFBR.....	54
FIGURA 4.6 CURVA DE ABSORBÂNCIA DAS ALGAS COM A ADIÇÃO DE EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM MFBR.....	56
FIGURA 4.7 CALOR RECUPERADO PELO TROCADOR DE CALOR.....	57
FIGURA 4.8 RENDIMENTO DO SISTEMA COM A RECUPERAÇÃO DE CALOR.....	57

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 3.1 PROPRIEDADES DO ÓLEO DIESEL.....	28
TABELA 3.2 DADOS TÉCNICOS DO MOTOR MWM 229.....	30
TABELA 4.1 TABELA DE VALORES DE ABSORBÂNCIA.....	56
QUADRO 3.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DO TERMÍSTOR 44031RC.....	43

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	=	Área de troca térmica do Trocador de Calor
c_p	=	Calor específico da água a pressão constante
$B_{\Delta x}$	=	Inconsistência da medição da variável
I	=	Corrente elétrica
FBR	=	Fotobiorreator
GMG	=	Grupo moto-gerador
GNV	=	Gás Natural Veicular
\dot{m}_a	=	Vazão mássica de água
\dot{m}_{biod}	=	Vazão mássica de biodiesel
\dot{m}_{comb}	=	Vazão mássica de Diesel
$mFBR$	=	Minifotobiorreator
$NPDEAS$	=	Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Autossustentável
NPV	=	Net Present Value (Valor Global Atual)
$P_{\Delta x}$	=	Limite de Precisão da Variável Medida
$P_{\Delta T}$	=	Limite de Precisão da Temperatura Medida
P_c	=	Limite de Precisão do Calor Específico
$P_{\dot{m}}$	=	Limite de Precisão da Vazão mássica medida
PCI_{biod}	=	Poder Calorífico Inferior do Biodiesel
PCI_{comb}	=	Poder Calorífico Inferior do Diesel
Q	=	Troca térmica entre os gases no Trocador de Calor
\dot{Q}_{aq}	=	Calor fornecido à água no Trocador de Calor
\dot{Q}_{bm}	=	Calor fornecido pela biomassa
\dot{Q}_{comb}	=	Calor fornecido pela Diesel
QTA	=	Quadro de Transferência Automática

t	=	<i>Tempo</i>
TC	=	<i>Trocador de Calor</i>
T_e	=	<i>Temperatura de entrada da água do Trocador de calor</i>
T_{efq}	=	<i>Temperatura de entrada do fluido quente no Trocador de Calor</i>
T_s	=	<i>Temperatura de saída da água do Trocador de calor</i>
T_{sfq}	=	<i>Temperatura de saída do fluido quente no Trocador de Calor</i>
T_{eff}	=	<i>Temperatura de entrada do fluido frio no Trocador de Calor</i>
T_{sff}	=	<i>Temperatura de saída do fluido frio no Trocador de Calor</i>
T_m	=	<i>Termistor</i>
T_p	=	<i>Termopar</i>
U	=	<i>Coefficiente Global de Troca Térmica</i>
$UFPR$	=	<i>UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ</i>
$U_{\Delta x}$	=	<i>Incerteza de Medição da Variável 'x' medida</i>
$U_{\dot{Q}}$	=	<i>Incerteza de Medição do Calor calculado</i>
V	=	<i>Tensão</i>
\dot{W}_{ele}	=	<i>Potência Elétrica</i>

SÍMBOLOS GREGOS

α	=	<i>Absorbância</i>
ε	=	<i>Coefficiente de extinção molar</i>
ΔT_m	=	<i>Temperatura média logaritimica</i>
Δx	=	<i>Varição da Variável Medida</i>
η_{SM}	=	<i>Rendimento Termodinâmico do Sistema Multigerador</i>

RESUMO

Considerando o aumento constante do consumo de fontes não renováveis de combustíveis e o agravamento das consequências da ação antrópica sobre o meio ambiente, torna-se imperativo do desenvolvimento de métodos mais eficientes de uso da energia relacionados ao desenvolvimento de fontes renováveis. Este trabalho, com essa motivação, consistiu no desenvolvimento experimental de um sistema multigerador associado ao cultivo microalgas para a produção de biomassa para biodiesel. Construiu-se um sistema composto de um grupo moto-gerador acoplado a um trocador de calor e a um fotobiorreator conceitual, de modo que são supridas demandas de energia elétrica, calor e dióxido de carbono. Foi realizada uma análise termodinâmica e do efeito das emissões do motor Diesel no crescimento das microalgas. Constatou-se um aumento da eficiência de 39,5% no sistema quando comparado a um grupo gerador operando isoladamente, sendo que as emissões contribuíram para o aumento da produção de biomassa. Desse modo, comprovou-se a possibilidade de aproveitamento das emissões para o cultivo microalgal em sistema que não emite gases de efeito estufa.

Palavras chave: multigeração, análise termodinâmica, microalgas, biodiesel

ABSTRACT

Considering the steady increase in the consumption of non-renewable fuels and worsening of the consequences of human action on the environment, it becomes imperative to develop more efficient methods of energy use related to the development of renewable energy sources. This work, with this motivation, consisted on the development of an experimental multigeneration system associated with the microalgae farming for the production of biomass for biodiesel. A system composed of a motor-generator coupled to a heat exchanger and a conceptual photobioreactor was built, so that the demands of electricity, heat and carbon dioxide are supplied. A thermodynamic analysis and a study of the effect of the emissions from the diesel engine in the growth of microalgae were carried out. The system efficiency was enhanced by 39.55% when compared to a system where a generator operates isolated, and the emissions have increased the production of biomass. Thus, it was proved the possibility of use of emissions in microalgae cultivation within a system that does not emit greenhouse gases.

Keywords: multigeneration, thermodynamic analysis, microalgae, biodiesel

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO PROPOSTO

Conforme o documento *World Energy Outlook* (2009), publicado pela Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico em conjunto com a Agência Internacional de Energia, o consumo energético mundial deve crescer aproximadamente 40% entre 2006 e 2030. Preveem-se, ademais, grandes aumentos nas emissões de gases estufa. O crescimento da demanda de energia global e a expectativa de redução do suprimento e, finalmente, do desaparecimento do combustível fóssil são motivações para a busca de fontes renováveis para geração de energia elétrica, aquecimento, refrigeração, ar condicionado, transporte e outros processos. Um dos cenários possíveis de uso de fontes renováveis de baixa intensidade é a geração distribuída de energia elétrica nos locais das aplicações, através de sistemas de baixa potência e com baixo impacto ambiental. Neste contexto se situam os combustíveis renováveis (de carbono “neutro”) como necessários para a sustentabilidade econômica e ambiental.

O biodiesel derivado de plantações é uma dessas alternativas de combustível de carbono “neutro” para os combustíveis fósseis. O problema é que o biodiesel de plantações, resíduo de óleo de cozinha e gordura animal não pode atender sequer uma pequena parte da demanda de combustíveis, uma vez que exigiria áreas plantadas não realísticas, mesmo para um país de extensão continental como o Brasil. Chisti (2007) reporta que, se o óleo de palma (planta de alto conteúdo de óleo) fosse utilizado para produzir biodiesel, 24 % da área cultivável de terra dos Estados Unidos seria necessária para atender 50 % da demanda anual de combustível para transporte.

Assim, uma alternativa viável é a utilização de microalgas como fonte de biodiesel renovável que poderia atender a demanda de combustível para geração de energia e transporte. As microalgas são organismos microscópicos e possuem aptidão excepcional para produção de óleos, podendo chegar a 77% do seu próprio peso seco (CHISTI, 2007). Paralelamente, podem duplicar o número de células num dia, devido a sua alta taxa de crescimento. Caso as microalgas forem utilizadas para produzir biodiesel, para atender a metade da demanda de combustível exigida para transporte no

EUA, seriam necessários apenas de 1 a 3% de área cultivável daquele país (CHISTI, 2007).

As microalgas necessitam de energia solar e CO₂ para produzirem óleos, mas com uma eficiência muito maior do que em plantações de oleaginosas. Um estudo recente demonstra que a produtividade de óleo de muitas microalgas é notavelmente superior à de plantações de oleaginosas (CHISTI, 2007), enfatizando a eficiência das microalgas como insumo para a produção de biocombustíveis.

O meio mais fácil e econômico de cultivar esses micro-organismos é em tanques ou lagoas, sendo este meio o tradicional, geralmente destinado a alimentação humana e aquíicultura (MARIANO *et al.*, 2009). Nesse tipo de cultura, têm-se baixo rendimento e um pequeno aproveitamento do CO₂ do ar. Também pode haver contaminação dos tanques ou lagoas por outros organismos, como bactérias, fungos e protozoários.

Procurando minimizar os problemas encontrados no método de cultivo tradicional e, buscando maximizar o rendimento e aproveitamento de luz solar e CO₂, foi desenvolvido o cultivo de microalgas através de fotobiorreatores. Esses equipamentos, geralmente, são constituídos de circuitos fechados construídos com tubos plásticos transparentes ou de vidro, com recirculação de água e microalgas, cuja principal função é o crescimento e a reprodução acelerada daquele micro-organismo, aproveitando ao máximo a luz solar e o CO₂ disponível. Atualmente, há uma gama muito grande de fotobiorreatores, com inúmeras geometrias, como em forma de painéis achatados, serpentinadas, espirais, cilindros, contudo, em termos de produção em larga escala, os tubulares são os mais indicados (MOLINA GRIMA *et al.*, 1999).

Ainda, no que concerne ao uso da energia em instalações comerciais e industriais, verifica-se, geralmente, grande desperdício de energia térmica. Faz-se necessário desenvolver novas maneiras de gerar e utilizar energia com a maior eficiência possível e com um mínimo de efeitos danosos ao meio ambiente. É esse o foco das iniciativas que fazem uso do conceito de cogeração e de multigeração.

Em razão do exposto e em razão da importância do desenvolvimento de tecnologia na área de biocombustíveis e recursos renováveis foi criado o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Auto-Sustentável (NPDEAS) localizado no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba – Paraná. A proposta inicial do NPEDAS é demonstrar e viabilizar o conceito de geração de potência

distribuída autossustentável a partir de biodiesel extraído das microalgas mediante a produção de biomassa de microalgas e sua transformação em biodiesel, com geração local de energia de modo eficiente e com aproveitamento das emissões no cultivo de microalgas.

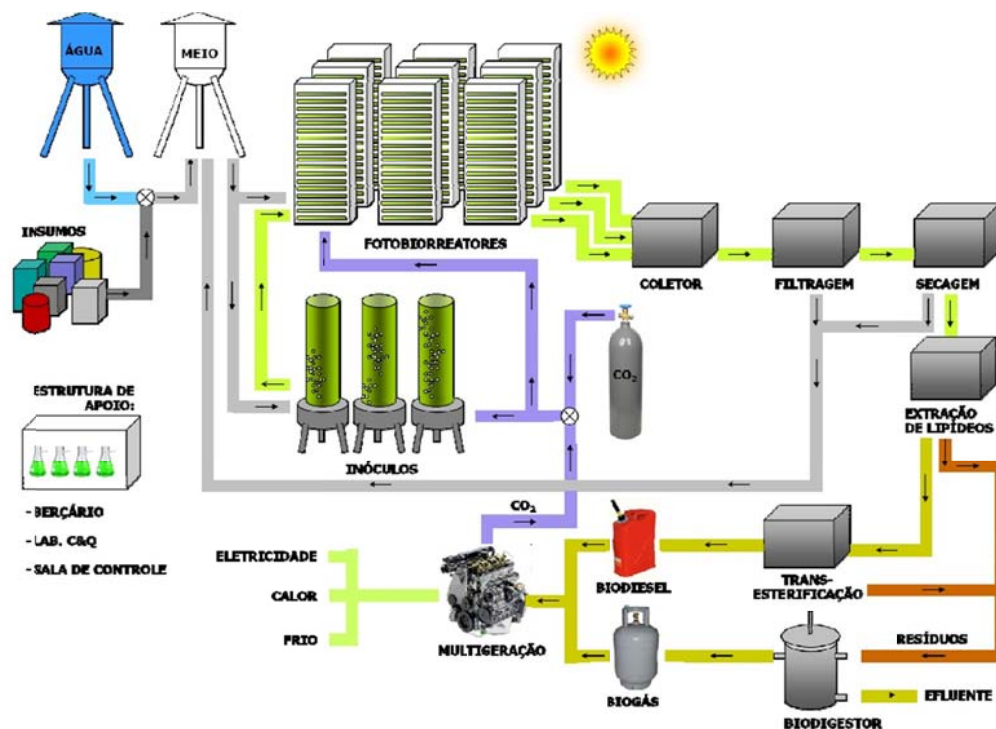


FIGURA 1.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO NPDEAS/UFPR

O grupo de pesquisa reunido no NPDEAS tem como objetivos gerais demonstrar o conceito de geração de potência distribuída auto-sustentável a partir do biodiesel, pelo projeto, instalação, comissionamento, operação e acompanhamento de um conjunto fotobiorreator para cultivo de microalgas – sistema de produção de biodiesel – biodigestão de resíduos – moto-gerador, acionado por motor a combustão interna utilizando biodiesel e biogás, operando em trigeração (calor, eletricidade e frio simultâneos) com fornecimento de CO₂ para o cultivo das microalgas.

Nesse contexto desenvolve-se o trabalho proposto, que consiste na concepção e operacionalização de um sistema multigerador capaz de gerar, simultaneamente, eletricidade e calor ao edifício NPDEAS e de fornecer dióxido de carbono a um fotobiorreator conceitual (mFBR) com volume de 60 litros destinado a produzir biomassa de microalgas para a produção de biodiesel.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O ordenamento segue uma estrutura lógica, fundamentada em cinco capítulos divididos da seguinte maneira:

- **INTRODUÇÃO:** Expõe quais são as motivações e o contexto no qual o sistema de multigeração está inserido. Apresenta o NPDEAS e também aborda a concepção dos fotobiorreatores. Descreve-se de maneira sucinta o sistema de multigeração;
- **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:** São revistos trabalhos relacionados com o tema desta dissertação. É realizada uma revisão bibliográfica descrevendo metodologias, resultados e discussões correlatas, caracterizando o estado da arte sobre o assunto. Com base na revisão bibliográfica, são definidos os objetivos gerais e específicos para esta dissertação;
- **MATERIAIS E MÉTODOS:** Nesta parte do trabalho são descritos os materiais, as unidades experimentais, a instrumentação e os equipamentos auxiliares utilizados no desenvolvimento dos trabalhos, sendo este então, o capítulo voltado a Materiais e Métodos. Também são mostradas as metodologias aplicadas para a obtenção dos objetivos específicos deste trabalho;
- **RESULTADOS:** Resultados e Discussões apresentam resultados obtidos, explicando e analisando como foram atingidos os objetivos estabelecidos;
- **CONCLUSÕES:** Realiza-se uma síntese do trabalho realizado, destacando como os resultados podem auxiliar no progresso e avanço do estudo de sistemas multigeradores, bem como sugestões de trabalhos futuros que permitam o futuro desenvolvimento de sistemas multigeradores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mediante a análise da literatura constata-se a existência de diversos estudos visando o desenvolvimento diversos modelos construtivos de fotobiorreatores e de triggeradores, porém se verifica que o estudo dessa matéria ainda é incipiente. Nesse contexto, observa-se que a maior parte da pesquisa sobre triggeração foi conduzida recentemente, nos últimos 10 anos. Verifica-se, não obstante, um grande incremento na produção científica em razão das vantagens observadas no sistema.

O sistema construído no presente trabalho associa a geração combinada de energia eletromecânica e térmica com o suprimento de dióxido de carbono para o cultivo de microalgas em um fotobiorreator manufaturado em escala laboratorial. Nesse contexto, são particularmente relevantes os conceitos de cogeração e triggeração e o conhecimento dos métodos disponíveis para o cultivo de microalga. Uma análise bibliográfica referente a esses temas é exposta a seguir.

Pode-se definir um sistema de cogeração como aquele no qual são produzidas duas formas de energia, usualmente calor e eletricidade, de maneira combinada a partir de uma fonte energética primária. Um sistema de cogeração geralmente consiste de um motor a combustão interna ou uma turbina a vapor ou a gás que acionam um gerador elétrico. Nesses sistemas, um trocador de calor recupera o calor dos gases de exaustão para produzir água quente ou vapor.

Conforme Eames *et al.* (1998), um sistema de cogeração é considerado eficiente quando a razão entre potência elétrica e a potência térmica tende a 1,0. Vedamurty *et al.* (1990) avaliaram a influência dessa razão sobre os parâmetros termoeconômicos de uma planta de cogeração e demonstraram, mediante um modelo computacional, a existência de um valor ótimo para a referida vazão de acordo com o processo a que se destina a planta.

Uma planta de cogeração, segundo Jaber *et al.* (2001), fornece a quantidade de calor e de potência elétrica com uma economia de combustível que pode chegar a 30% do que seria necessário para produzir separadamente o calor e a eletricidade requeridas. Outra vantagem é a redução do volume da planta pela interligação dos processos, que se associa à redução do impacto ambiental.

É possível encontrar diversas aplicações da cogeração na indústria alimentícia (FANTOZZI *et al.*, 2000). Gunzbourg *et al.* (1999) apresentam um modelo de cogeração aplicada a plantas térmicas de alta eficiência para dessalinização da água do mar, reduzindo o custo do processo. Algumas aplicações residenciais são encontradas em Roflsman (2004); Grohnheit *et al.*(2003); D'Accadia (2003); Bourgeois *et al.*, 2003. Aplicações comerciais são encontradas em Alanne *et al.* (2004) e em Szklo *et al.* (2004).

2.1 TRIGERAÇÃO

Um sistema de trigerção pode ser definido como a produção combinada e simultânea de eletricidade, calor e frio a partir de uma única fonte de energia primária. Essa aplicação é associada ao conceito de cogeração. A potência elétrica comumente é produzida por um motor térmico (turbina a gás ou motor de combustão interna) ou por uma célula de combustível (GUNES *et al.*, 2003; BURER *et al.*, 2003; PARISE *et al.*, 2005), enquanto os gases de combustão em alta temperatura têm seu calor recuperado, para suprir uma demanda por calor e frio, esta obtida mediante sistemas de refrigeração por absorção ou por compressão do vapor. Hernández-Santoyo *et al.* (2003) descrevem o sistema de trigerção como uma planta de cogeração à qual foi adicionado um *chiller* de absorção.

Míguez *et al.* (2004) e Porteiro *et al.* (2004) apresentam aplicações de geração conjunta de calor, frio e potência elétrica usando a compressão de vapor. Costuma-se, ainda, interligar a instalação à rede de distribuição local de energia elétrica, o que, segundo d'Accadia (2001), permite um consumo de eletricidade que possibilita uma redução de custos ou eventual venda do excedente produzido.

2.1.1 Classificação dos Sistemas de Trigerção

Quanto ao uso de calor e frio, Héteu *et al.* (2002) distinguem duas categorias de plantas de trigerção:

- (1) Plantas de trigerção contínua: produção simultânea de eletricidade, calor e frio, tendo como exemplos de aplicação hospitais;

- (2) Plantas sazonais de trigerção: mantém a possibilidade de trigerção simultânea, porém o uso do aquecimento é limitado ao inverno e o da refrigeração, ao verão – tais aplicações encontram aplicação residencial (GUNES *et al.*, 2003), em edifícios de escritórios e em hotéis.

Quanto aos modos de operação, Míguez *et al.* (2004) definem cinco tipologias:

- (1) Modo *stand-by*: sem demanda térmica e elétrica ou quando os acumuladores térmicos e elétricos encontram-se carregados;
- (2) Modo gerador elétrico: somente eletricidade é requerida;
- (3) Modo de cogeração: quando há uma demanda de eletricidade associada a uma demanda de aquecimento passível de ser coberta pelo calor rejeitado pelo motor ou célula de combustível;
- (4) Modo bomba de calor (verão): adotado quando há demanda de refrigeração;
- (5) Modo bomba (inverno): adotado quando o calor recuperado está abaixo das necessidades da instalação.

Al-Sulaiman *et al.* (2010) classificam os sistemas de trigerção conforme a fonte primária de movimento e calor:

- (1) Motor a combustão interna;
- (2) Motor a combustão externa;
- (3) Turbina a vapor;
- (4) Turbina a gás;
- (5) Microturbinas;
- (6) Células de combustível.

Ainda, os mesmos autores apresentam uma classificação baseada no sistema de refrigeração:

- (1) Refrigeração por absorção;
- (2) Refrigeração por adsorção;

(3) Refrigeração por ciclo de compressão;

Finalmente, quanto à nomenclatura dos sistemas de cogeração e de trigerção:

- (1) CHP (*Combined Heat and Power*), observada em diversos escritos, como em Maldague (1984) e Alanne *et al.* (2004);
- (2) CCHP (*Combined Cooling Heating and Power*), conforme Franco *et al.* (2002);
- (3) IGSC (*Integrated Gas and Steam Cycle*), Segundo Colpier *et al.* (2002);
- (4) ACC (*Advanced Combined Cycles*), de acordo com Akiyama *et al.* (1997);
- (5) Sistemas Híbridos, em Oliveira *et al.* (2002)
- (6) Trigerção, em Berndsen (2006).

Mediante a classificação dos tipos de sistemas trigeradores, verifica-se que esses sistemas não apresentam um padrão construtivo uniforme. São sistemas que se relacionam a uma demanda energética específica e à disponibilidade de equipamentos de refrigeração. Usualmente, são utilizados trocadores de calor de diversas tipologias, assim como diferentes modelos de refrigerador, apesar da predominância do uso de refrigerador de absorção e de trocadores de calor do tipo casco e tubo.

Diante da observação das classificações de sistemas trigeradores, constata-se que esses sistemas podem ser definidos como um conjunto de equipamentos destinados a aumentar o rendimento termodinâmico de um sistema e aproveitar a energia fornecida por uma fonte primária de energia para a produção combinada de frio, calor e eletricidade, fazendo uso da energia que, de outra forma, seria rejeitada para o ambiente. Nesse contexto, o uso da nomenclatura sistema multigerador deve-se ao fato de o presente trabalho associar a geração de produtos energéticos relacionada à produção de biomassa de microalgas para a produção de biodiesel, com o aproveitamento das emissões geradas pelo grupo gerador. Trata-se de um equipamento que aproveita não apenas o calor resultante do processo de geração de eletricidade a partir da energia mecânica, mas também as emissões decorrentes do processo de combustão do motor Diesel/Biodiesel.

2.1.2 Aplicações atuais de sistemas de trigeriação

No presente estudo, optou-se por enfatizar o estudo de sistemas de trigeriação com o uso de motores a combustão interna devido à relevância relativa à construção do sistema multigerador apresentado neste trabalho, no qual destaca-se a geração e a produção local de energia. O presente estudo foi compartimentalizado conforme o tipo de análise realizada em cada estudo de caso (energética, econômica, ambiental e exergética).

2.1.2.1 Estudos com análise energética

Lin *et al.* (2001) caracterizaram um sistema trigeriação com capacidade de geração de 275 MW de potência elétrica. Os autores concluíram que, em sistemas que usam *chillers* de absorção, a temperatura de retorno da água é um dos principais fatores que determinam o desempenho do sistema, pois essa condição afeta o rendimento do *chiller*.

Maidment *et al.* (2002) realizaram um estudo da trigeriação aplicada em supermercados. Foi realizada uma análise energética para cinco esquemas, cada qual utilizando um *chiller* de absorção diferente. O estudo revelou que, no curto e médio prazos, a trigeriação pode resultar em um consumo significativamente menor de combustível e uma redução nas emissões de CO₂ quando se compara a trigeriação com a energia produzida por um aquecedor a gás e por uma usina elétrica a carvão.

Cardona *et al.* (2003) destacam os benefícios da trigeriação utilizando refrigeradores por absorção em relação a plantas fazendo uso da cogeração ao estudarem o dimensionamento de plantas trigeriação para a região mediterrânea europeia. O foco da análise é a eficiência termodinâmica de um sistema trigeriação baseado na demanda energética de hotéis.

Cardona *et al.* (2003) desenvolveram um método para monitorar uma instalação de trigeriação destinada a atender uma demanda de 500 kW de potência elétrica e de 600 a 700 kW destinados a suprir calor ou frio, conforme a estação do ano, em um edifício de escritórios. O sistema é composto por um motor de combustão interna a gás natural que aciona um gerador elétrico, um mecanismo de recuperação do calor rejeitado e por

um *chiller* de absorção. O calor é recuperado do sistema de arrefecimento do motor e dos gases de exaustão do mesmo, usado para suprir as necessidades térmicas da planta.

Míguez *et al.* (2004) e Porteiro *et al.* (2004) desenvolveram um sistema de trigeriação composto por um motor de combustão interna de 9,6 kW que aciona um gerador elétrico e o compressor de um sistema de refrigeração reversível (capaz de atuar como bomba de calor). Segundo os autores, a contribuição da bomba de calor é um fator determinante na eficiência global do sistema, tanto no verão quanto no inverno.

Pruzaesky (2005) realizou uma análise de um sistema de produção simultânea de eletricidade, frio e calor. A produção de água gelada foi realizada por um sistema de refrigeração por compressor, sendo que este é acionado eletricamente. Houve a conversão de um motor diesel para operar com gás natural veicular. Esse motor, acoplado a um gerador de eletricidade, supre a energia elétrica necessária para o acionamento do refrigerador e de uma demanda específica. O calor que seria rejeitado pelo condensador, pelo sistema de arrefecimento do motor e pelos gases de combustão é recuperado para a produção de água quente. Embora o foco do trabalho tenha sido na caracterização do motor Diesel/GNV, a análise termodinâmica constatou uma eficiência exergética de 30%.

Pospisil *et al.* (2006) compararam cogeração e trigeriação em aplicações no setor terciário e constataram que, ao comparar ambos os casos com a produção separada de frio, calor e eletricidade, uma planta de cogeração consome 31% menos da fonte primária de energia, ao passo que um sistema de trigeriação apresenta uma economia de 39% de consumo. (relacionado à menor eficiência do sistema de refrigeração)

Huang Fu *et al.* (2007) realizaram um estudo em um sistema de trigeriação de pequeno porte utilizando um refrigerador por adsorção. Os autores avaliaram o desempenho do sistema de refrigeração em diferentes condições de aquecimento e constataram uma relação quase linear entre o desempenho do resfriamento por adsorção e a variação da temperatura de entrada de água quente no *chiller*.

Chicco *et al.* (2009) apresentam um modelamento matricial de sistemas de trigeriação pequenos e sua aplicação para a otimização operacional da planta. Para tanto utilizam uma aproximação matricial de entradas e saídas com o propósito e efetuar o

modelamento considerando as interações entre os componentes da planta e das redes de fornecimento de energia externas.

2.1.2.2 Estudos com análise econômica

Bassols *et al.* (2002) analisaram diferentes aplicações na indústria alimentícia. Observaram como a adição de um *chiller* de absorção poderia ser usada para produzir frio aproveitando o calor gerado nos diferentes sistemas. Dentre as possibilidades avaliadas, destacou-se o estudo de uma planta de cogeração destinada à produção de margarina. Os autores demonstraram a viabilidade econômica do uso da energia térmica proveniente de água quente, vapor e emissões que de outra forma seriam rejeitadas em sistemas de refrigeração por absorção.

Temir *et al.* (2004) analisaram o desempenho termoeconômico de um sistema de trigeração de grande porte produzindo energia elétrica mediante um gerador elétrico acoplado a um motor de combustão interna a gás de 1900 kW de potência. O calor é recuperado do sistema de arrefecimento e dos gases de combustão do motor e usado para suprir a demanda térmica da instalação. O estudo destaca a alta irreversibilidade dos processos termodinâmicos no motor e desaconselha seu uso apenas para a geração de energia elétrica, destacando o aumento do rendimento termodinâmico e econômico de sistemas trigeradores desses sistemas. Os autores, ademais, concluíram que os custos de operação e manutenção do sistema de absorção são fatores econômicos mais importantes a serem considerados em relação à viabilidade econômica e em relação à eficiência termodinâmica do sistema.

Diversos estudos foram realizados fazendo uma análise energética e econômica. Chicco *et al.* (2006) compararam seis diferentes esquemas de geração de frio, um dos quais não era uma planta de trigeração, e examinaram o efeito da variação dos preços da eletricidade e do gás sobre os custos do sistema. Chicco *et al.* (2005) propuseram alguns indicadores de energia para analisar a eficiência relativa ao combustível em uma planta de trigeração em comparação com um sistema convencional de produção de frio, calor e eletricidade. Em outro artigo Chicco *et al.* (2006) aplicaram esses indicadores para criar um critério de planejamento que denominaram preço equivalente do gás e aplicaram-no em diversos casos. Posteriormente, Chicco *et al.* (2007) aplicaram os indicadores de

energia por eles elaborado em 2005 para diferentes demandas de frio, calor e eletricidade. A eficiência global do sistema variou entre 40 e 55%, sendo que o parâmetro de eficiência econômica foi uma taxa de redução do consumo da fonte primária de energia, que oscilou entre -5% (aumento do consumo) e 40%, dependendo das demandas combinadas de eletricidade, calor e frio.

Compernelle *et al* (2011) realizaram uma análise da contribuição de sistemas trigeradores para a redução de emissões de gases estufa associada à viabilidade econômica do sistema. A redução nos gastos com energia e redução das emissões de dióxido de carbono associadas foram os parâmetros usados para demonstrar a viabilidade econômica de sistemas de trigeriação. Estimou-se uma redução nas emissões de dióxido de carbono entre 30 e 39%, com uma estimativa de redução de consumo de combustível de aproximadamente 20%. O parâmetro utilizado para constatar a viabilidade econômica de sistemas trigeradores foi o valor global atual (NPV), que, conforme uma análise estatística, aumentaria com uma certeza acima de 87,72% e de 98,97%.

2.1.2.3 Análise Ambiental

Minciouc *et al.* (2003) fizeram uma análise de sistemas de trigeriação, considerando o impacto ambiental e o consumo de combustível. Os autores analisaram plantas utilizando turbinas a gás e motores a combustão interna com refrigerador por absorção. Concluiu-se que os sistemas de trigeriação apresentaram uma eficiência maior no consumo de combustível e, portanto, tiveram um menor impacto sobre o meio ambiente.

Lin *et al.* (2007) compararam experimentalmente a eficiência térmica e emissão de poluentes de um sistema trigerador destinado a aplicações domésticas com outra planta sem aproveitamento do calor excedente. Esses autores observaram um aumento da eficiência térmica comparada entre o dobro e o quádruplo. A redução das emissões de dióxido de carbono por quilowatt-hora para a planta trigeradora ficou entre 67,2 e 81,5%. Na análise, os autores compararam a planta trigeradora com um sistema que produzia apenas eletricidade; mais interessante teria sido comparar a planta com um sistema produzindo eletricidade, frio e calor a partir de uma única fonte de energia sem

o aproveitamento do excedente de calor do motor ou com uma planta na qual esses produtos sejam operem independentemente, cada qual com uma fonte de energia. Em outro estudo, Chicco *et al.* (2008) apresentaram um sistema de poligeração e indicadores de redução de emissões de dióxido de carbono.

O estudo da otimização de plantas trigeradoras é muito importante para o desenvolvimento e viabilidade econômica desse processo. Cho *et al.* (2008) apresentaram um programa utilizando uma formulação linear de uma planta de trigerção típica tendo como entradas o custo da energia elétrica ou combustível e as restrições das cargas demandadas para resfriamento, aquecimento e eletricidade. Os mesmos autores, em 2010, aplicaram a metodologia para 4 cidades estadunidenses não chegaram a resultados consistentes no que concerne à associação entre a redução do consumo de energia primária, a redução das emissões de dióxido de carbono e a diminuição dos custos associados, porém houve resultados consistentes no que concerne à reduções de emissões e do consumo da fonte primária de energia em sistemas trigeradores, com a redução desses parâmetros.

Godefroy *et al.* (2007) construíram, testaram e modelaram um sistema de trigerção de pequena escala a partir de um motor a combustão a gás natural e do ciclo de refrigeração por ejeção (o efeito de compressão é alcançado usando um fonte de calor ligada diretamente ao ejetor e ao condensador). A energia necessária ao ciclo de refrigeração, todavia, foi provida pelo gerador, o que resultou, no esquema, em menor eficiência e maiores emissões de dióxido de carbono. Observa-se que não se trata propriamente de um sistema de trigerção, considerando-se que o efeito refrigerador não decorre do aproveitamento de energia térmica, mas, sim, de energia elétrica, demonstrando que sistemas que operam dessa maneira apresentam desvantagens associadas ao menor aproveitamento da energia térmica.

Al-Sulaiman *et al.* (2010) discutem diversos aspectos de uma planta de trigerção, incluindo vantagens, desafios e um critério de eficiência para o sistema. Desenvolveram um estudo de um sistema de trigerção que tem como fonte primária de geração células de combustível sólidas associadas a um ciclo Rankine e contabilizaram as emissões de CO₂. Segundo esse estudo, há um potencial mínimo de 22% de ganho em eficiência quando se utiliza um sistema de trigerção e uma redução significativa

nas emissões quando se compara o sistema a um caso onde se produza somente energia elétrica.

2.1.2.4 Estudos Com Análise Exergética

Poucos estudos aplicaram uma análise exergética em plantas trigeradoras tendo como fonte primária de calor e movimento um motor a combustão interna. Huang Fu *et al.* (2007) realizaram uma análise exergética e de custo de um sistema de trigeriação em pequena escala utilizando refrigeração por adsorção. Os autores concluíram que os gastos com a implementação do sistema trigerador no caso estudado daria retorno econômico em 2,97 anos e que a demanda por eletricidade é importante para o desempenho do sistema, uma vez que, quando o sistema opera abaixo de metade de sua capacidade, ocorre redução significativamente da eficiência. Operando em plena capacidade, o sistema desenvolvido alcançou eficiência exergética de aproximadamente 25%.

Berndsen (2006) realizou o desenvolvimento experimental e fez uma análise termodinâmica de um sistema trigerador operando com um refrigerador por absorção, um motor de combustão interna a gasolina e GNV. O motor foi acoplado a um gerador elétrico de 30 kW. O calor dos gases de combustão foi recuperado para a produção de calor, mediante um trocador de calor casca e tubo, e para a produção de frio, por intermédio de um refrigerador por absorção de pequena capacidade. Obteve-se um rendimento energético de 62% e uma eficiência exergética de 53%.

Estudos mais amplos, incluindo análises exergética, exergoeconômica e de sensibilidade foram realizadas por Cardona *et al.* (2006, 2007). Os autores examinaram o efeito da fonte primária de calor e movimento – um motor a combustão interna – e da dimensão do *chiller* de adsorção em diferentes variáveis, dentre as quais o custo unitário da energia térmica, o custo exergético, o custo unitário da exergia para resfriamento e para eletricidade. Ao realizarem um estudo para reduzir o custo anual da demanda energética de um hospital, os autores alcançaram seu objetivo mediante uma análise da rentabilidade do sistema de trigeriação sobre outras plantas convencionais mediante a análise das demandas por eletricidade, calor e frio e da relação entre elas e o custo de operação, com a obtenção de valores ótimos para o consumo de frio, calor e eletricidade

associados a melhorias administrativas, como a racionalização do consumo dessas fontes energéticas.

Deng *et al.* (2008) realizaram uma análise exergoeconômica de um sistema de trigeriação de pequena escala e observaram que o sistema torna-se viável a partir de uma determinada taxa de energia utilizada.

Balli *et al.* (2010a, 2010b) realizaram uma análise termodinâmica e termoeconômica de um sistema trigeriação movido por um motor Diesel-gás. A análise termodinâmica incluiu parâmetros de desempenho para análises energética e exergética, enquanto a análise termoeconômica avaliou o benefício em relação ao custo dos produtos gerados em uma análise exergoeconômica. Na segunda parte do estudo foram apresentados os resultados, onde foram relatadas uma eficiência energética de 58,97%, um rendimento exergético de 36,31%, com uma redução no consumo de combustível de 24,90% e uma redução de 24,69% no desperdício de exergia.

2.2 CULTIVO DE MICROALGAS

Microalgas são organismos unicelulares autotróficos, capazes de sintetizar matéria orgânica a partir de substâncias minerais e de fixar a energia luminosa sob a forma de energia química mediante a fotossíntese. Esses organismos têm elevado potencial biotecnológico devido a uma imensa diversidade de espécies e da consequente variabilidade na composição bioquímica da biomassa possível de ser obtida. Muitas das substâncias sintetizadas por microalgas são igualmente produzidas em vegetais, porém a produção de microalgas apresenta a vantagem de ter uma incomparável taxa de crescimento. Essa característica relaciona-se ao fato da alga ser um organismo unicelular, o que permite uma reprodução acelerada, podendo a biomassa duplicar-se em dias.

Ademais, uma composição química mais homogênea da biomassa gerada, outra característica decorrente do fato de a microalga ser um organismo unicelular, permite um maior rendimento na extração do produto de interesse. Considerando-se que o conteúdo de lipídios da biomassa de microalgas pode alcançar até 85% do peso seco (BECKER, 2004), o cultivo desse organismo torna-se uma excelente alternativa para a produção de biocombustíveis.

O crescimento de uma população de microalgas é resultado da interação de fatores biológicos, físicos e químicos. Os fatores biológicos relacionam-se às taxas metabólicas da espécie cultivada, assim como à influência de outros organismos. Os fatores físicos e químicos são resultado, essencialmente, dos efeitos da iluminação, temperatura, pH e da disponibilidade de nutrientes. Diversos fatores influenciam esse processo, como a capacidade de reprodução da espécie e a tolerância a tensões mecânicas da célula. As exigências nutricionais variam conforme a espécie da microalga. Há demandas que parecem estar presentes em todos esses organismos unicelulares, como a presença de luz e de dióxido de carbono. A remoção do oxigênio e a agitação do meio de cultivo são medidas capazes de potencializar o crescimento das microalgas, assim como o controle da temperatura e da acidez do meio de cultivo.

De acordo com Lourenço (2006), as microalgas, apresentam um ciclo de vida considerado padrão, realizado em um sistema fechado, no qual ocorrem, fundamentalmente, 4 etapas. A primeira etapa, denominada fase *lag*, consiste no período em que não há aumento significativo da população, sendo uma espécie de período de adaptação. Essa etapa pode ocorrer como consequência de choques térmicos, físicos ou químicos. A segunda etapa é a fase de crescimento exponencial (*log*), quando as microalgas estão adaptadas plenamente ao meio. Na fase estacionária, começa a ocorrer escassez de nutrientes e uma maior quantidade de elementos tóxicos no meio; novamente, ocorre um período de estagnação no crescimento. A fase de declínio, ou de morte celular, ocorre devido ao agravamento das condições da fase estacionária.

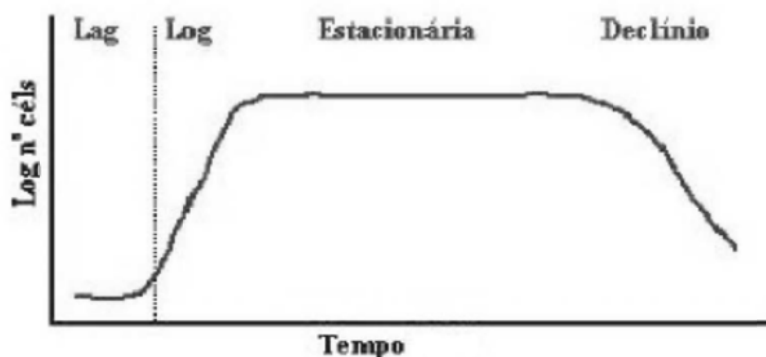


FIGURA 2.1 CICLO DE VIDA PADRÃO DAS MICROALGAS

Um fenômeno importante associado ao cultivo de microalgas é a fotoinibição. Trata-se de um estresse fisiológico pelo qual organismos fotossintéticos são submetidos quando ocorre excessiva exposição à luz, situação que pode ser agravada pela falta de água e por elevadas temperaturas. Essa situação relaciona-se à foto-oxidação de enzimas responsáveis pela fotossíntese. Em microalgas, o efeito da fotoinibição pode ser mitigado mediante a adição de um excedente de dióxido de carbono em relação ao metabolismo normal da célula.

A intensidade e o tempo de exposição à luz influenciam diretamente no crescimento das microalgas. A luz pode ser decomposta em diversas faixas de comprimentos de ondas, o que, segundo Pulz *et al.* (1998), podem influenciar no crescimento das microalgas. Lehr *et al.* (2009) apresentam indícios de que apenas uma parcela da banda de radiação solar é capaz de ativar a fotossíntese, aquela com comprimento de onda entre 400 e 700 nm – o equivalente ao espectro da luz visível. Häder *et al.* (2001) destacam ainda que a exposição a comprimentos de onda entre 280 e 400 nm podem provocar fotoinibição, propondo uma filtragem dessa faixa espectral de modo a maximizar a produção de algas.

Em fotobiorreatores, deve-se maximizar a captação de luz solar (SUH *et al.*, 2003). Com esse objetivo, Molina Grima *et al.* (2001) realizaram um cálculo do perfil de iluminação em perfis tubulares. No estudo, foi usado o modelo de distribuição de irradiância proposto Ación Fernández *et al.* (2001), o qual foi experimentalmente validado por García Camacho *et al.* (1997). O perfil de iluminação é ilustrado na Figura 2.2.

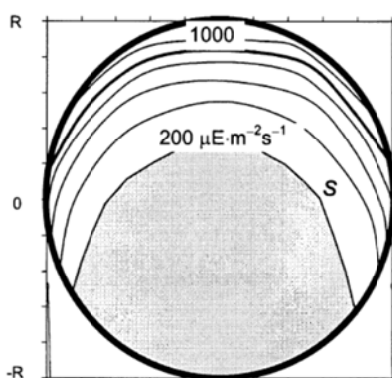
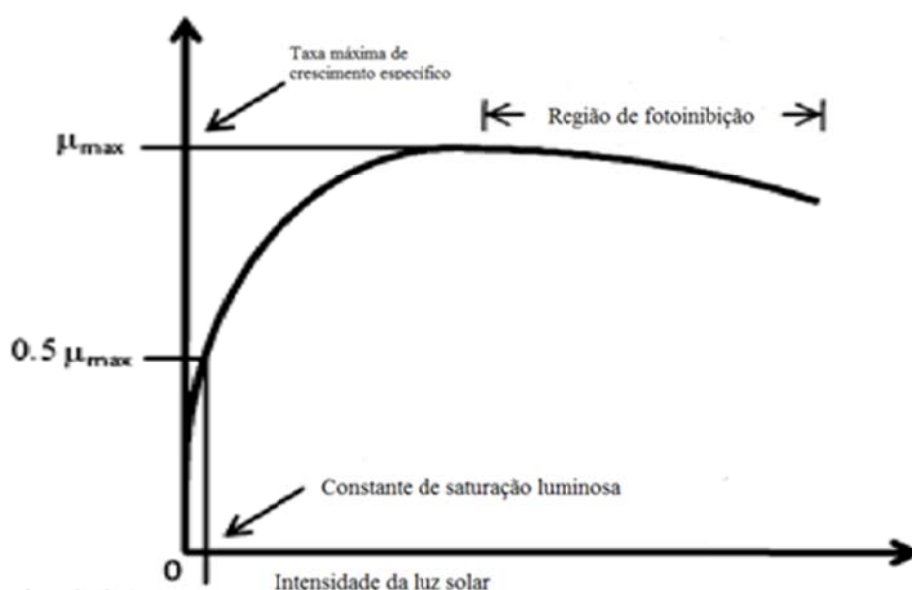


FIGURA 2.2 PERFIL DE ILUMINAÇÃO NA TUBULAÇÃO DE UM FOTOBIORREATOR (MOLINA GRIMA *et al.*, 2001)

Conforme a ilustrado na Figura 2.1, na parte inferior do tubo, há uma área na qual há pouca penetração de luminosidade. Nessa área, as microalgas não realizarão a fotossíntese e apresentarão menor crescimento caso o escoamento seja laminar.

O excesso de exposição à luz, assim como a escassez luminosa e a exposição a determinados comprimentos de onda, pode reduzir o potencial de crescimento das microalgas em razão do fenômeno da fotoinibição. Suh e Lee (2003) mostram evidências de que, caso a intensidade luminosa exceda um limite denominado ponto de saturação, a cultura pode apresentar redução em seu crescimento. Caso o limite do ponto de saturação seja em muito ultrapassado, há a possibilidade de que os mecanismos de fotossíntese das microalgas sejam prejudicados. Satyanarayana *et al.* (2011) exhibe um gráfico, ilustrado na Figura 2.2, que demonstra o efeito da intensidade luminosa na taxa de crescimento específico das microalgas.



Adaptado de Satyanarayana *et al.* (2011)

FIGURA 2.3 CRESCIMENTO ESPECÍFICO DAS MICROALGAS COMO FUNÇÃO DA EXPOSIÇÃO À LUZ SOLAR

Desse modo, constata-se que o escoamento turbulento pode maximizar a produção de algas em fotobiorreatores. Em fotobiorreatores tubulares, há uma regiões com menor exposição luminosa, o que reduz a capacidade de crescimento da microalga

(MOLINA GRIMA *et al.*, 2001). Deve-se considerar igualmente o efeito da fotoinibição, causado por um excesso de exposição à luz (SUH *et al.*, 2003). Ambas as contingências podem ser mitigadas mediante um escoamento turbulento, no qual haverá uma dispersão do fluido de cultivo no interior da tubulação, tornando a exposição solar das microalgas mais homogêneo. O escoamento turbulento permite um maior contato entre os nutrientes do meio de cultivo com as microalgas (KUNJAPUR *et al.*, 2010). Evita-se ainda, a sedimentação das microalgas. O contraponto desses benefícios é a possibilidade de causar-se um estresse hidrodinâmico nas algas, efeito observado por Suh *et al.* (2003), o que reduz a eficiência do cultivo.

O efeito o estresse hidrodinâmico é agravado quando se usam bombas e válvulas para realizar o deslocamento do fluido. Os rotores da bomba promovem danos às células, efeito observado por Vandanjon *et al.* (1998) e Chisti (1999). Os primeiros estudaram os efeitos da restrição causada por válvulas, obtendo um coeficiente que aponta um limite para as restrições ao fluxo do cultivo conforme o tipo de bomba e o tipo de válvula. O estudo recomenda o uso de válvulas globo e demonstra que bombas centrífugas são mais danosas ao cultivo das microalgas analisadas no estudo.

A adição de dióxido de carbono ao meio de cultivo, mediante a aeração ou a inserção de emissões contendo gás carbônico, é útil para o adequado crescimento das microalgas. Esse elemento é imprescindível para a realização da fotossíntese em organismos autotróficos, podendo ser capturado do ar ou das emissões geradas por uma máquina térmica. A adição do dióxido de carbono associa-se também ao controle do pH da cultura de microalgas (UGWU *et al.*, 2008).

Ao realizarem a fotossíntese, as microalgas produzem oxigênio e glicose por meio do processo de fotossíntese. Conforme Suh *et al.* (2003), uma concentração excessiva de oxigênio no meio de cultivo pode causar a degradação das microalgas em determinado período de tempo. Chisti (2007) observou que esse efeito é agravado quando há excessiva exposição à luz solar, podendo ocorrer o fenômeno da foto-oxidação.

Como a concentração de oxigênio no meio pode torná-lo tóxico às microalgas, é necessário sua expulsão do cultivo. Assim, a taxa de crescimento das microalgas é positivamente afetada pelo aumento da eficiência da troca gasosa. Com o intuito de realizar essa troca gasosa, desenvolveram-se equipamentos como o desgaseificador

(*degasser*) – em Chisti (2007) – ou uma coluna de elevação de ar (*airlift*) – em Molina *et al.* (2001).

É necessário, para o crescimento adequado das microalgas, além de luz e dióxido de carbono, prover esses organismos de nutrientes. Kunjapur *et al.* (2010) apontam elementos necessários para o cultivo de microalgas. Chisti (2007) identificou alguns elementos que podem ser adicionados em excesso, influenciando positivamente no cultivo, porém as microalgas reagirão à composição do meio de cultivo conforme sua espécie. Penteadó (2010) realizou estudos acerca da influência dos nutrientes o aumento da produção de lipídios na microalga *Phaedactylum tricornutum*, com aumento na concentração da biomassa seca de até 228% relacionada à adição de fosfato e nitrogênio ao meio de cultivo F/2 Guillard. Desse modo, não há uma composição padronizada de um meio de cultivo para microalgas. Estudos realizados pelo grupo NPDEAS indicam o meio de cultivo Chu modificado (OLIVEIRA, 2010).

Manter uma temperatura constante e apropriada à espécie da microalga é muito importante para um cultivo eficiente. Variações da temperatura prejudicam o cultivo, porém a redução da temperatura, conforme constatou Chisti (2007), são menos prejudiciais.

2.2.1 Sistemas de Cultivo de Microalgas

O cultivo de microalgas pode ser realizado em sistemas abertos ou em sistemas fechados. Nos sistemas abertos, há contato direto do meio de cultivo com o ambiente, como no caso de lagoas e tanques de cultivo. Nos sistemas fechados, o meio de cultivo não tem contato direto com o ambiente, o que reduz a possibilidade de contaminação da cultura por outros micro-organismos (TREDICI, 1999).

Os sistemas abertos são os mais usados para finalidades comerciais. Mais comumente tratam-se de lagoas circulares como as descritas por Suh *et al.* (2003), exemplificadas na Figura 2.4. Esse fato deve-se ao baixo custo de montagem e operação do sistema, entretanto há constante contaminação do meio de cultivo por outros organismos, evaporação da água, pouca difusão de dióxido de carbono e baixo aproveitamento da luz solar. Essas características resultam em um sistema com baixa produtividade que ocupa uma grande área. Conforme Kunjapur *et al.* (2010), a

eficiência das lagoas de cultivo pode ser aumentada pela inserção de agitadores do meio e pela difusão de gás carbônico, no entanto isso resultaria em aumento dos custos da operação.

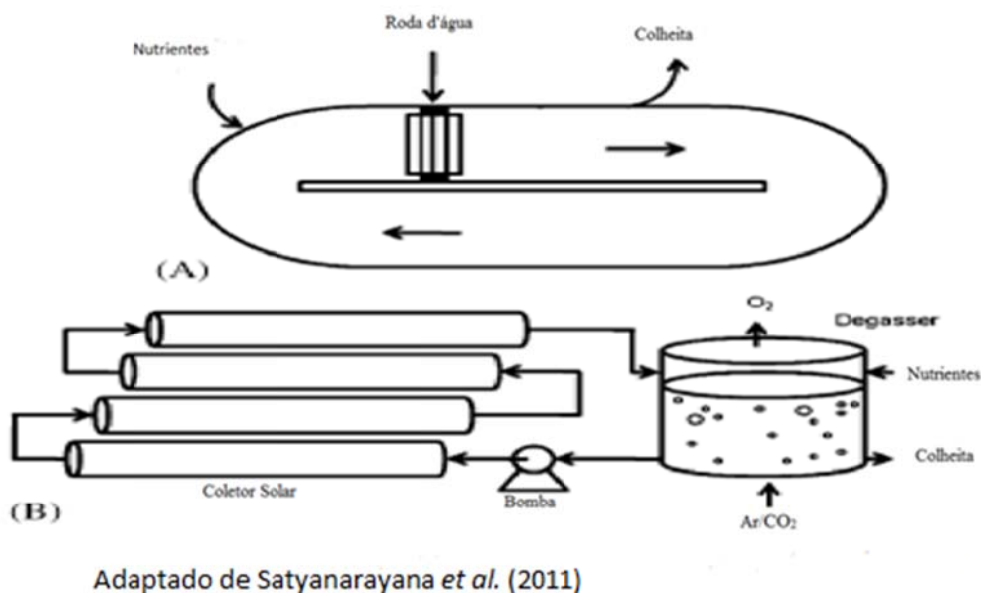


FIGURA 2.4 DIAGRAMA DE UMA LAGOA DE CULTIVO DO TIPO PISTA DE CORRIDA (A) E DE UM FOTOBIORREATOR TUBULAR (B)

Os sistemas fechados têm uma produtividade maior e uma área ocupada menor quando comparados aos sistemas abertos, contudo apresentam custos de instalação e operação significativamente maiores. Esses fotobiorreatores podem ser construídos em recintos fechados ou abertos. Em recintos fechados, há possibilidade de controle da temperatura, da intensidade luminosa e do comprimento de onda da luz que incide no fotobiorreator. Esse tipo de sistema, ilustrado na Figura 2.5, tem seu principal uso no estudo científico, devido ao seu elevado custo (KUNJAPUR *et al.*, 2010)



FIGURA 2.5 SISTEMAS INTERNOS DE CULTIVO DE MICROALGAS (SCHENK *et al.*, 2008)

Os sistemas fechados, quando localizados à céu aberto, tem operação e construção mais complexas. O local e a direção do fotobiorreator devem ser considerados, pois, conforme Chisti (2007), há uma orientação ótima do coletor solar que possibilite uma maior exposição do sistema à luz solar, conforme a Figura 2.6.

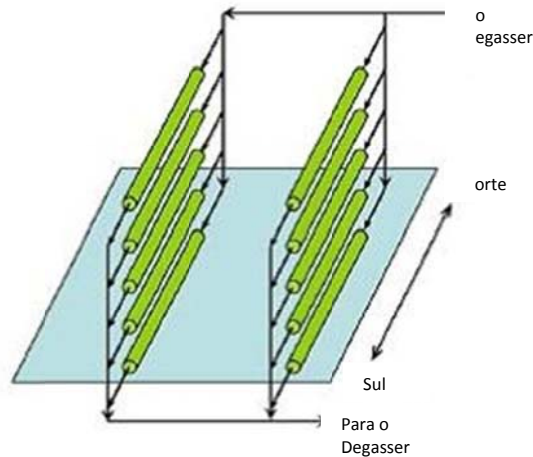


FIGURA 2.6 Orientação do coletor solar em relação ao sol (Modificado de CHISTI *et al.*, 2007)

Outras questões relacionadas ao cultivo de microalgas em fotobiorreatores referem-se à variação da temperatura e da intensidade da luz solar, assim como a concentração de oxigênio no sistema, o controle de seu pH e a difusão de dióxido de carbono no sistema.

Diversos autores constataram a eficácia e o caráter promissor do cultivo de microalgas em fotobiorreatores. Converti *et al.*, em 2006, mostra a eficiência da produção de um tipo particular de microalga criada em fotobiorreator tubular inclinado em relação a tanques (lagoas), sendo aproximadamente de 6 a 7 vezes maior, caracterizando este modelo de cultivo como sendo expressivo e extremamente promissor.

Ai *et al.* (2008) pesquisa e desenvolve um fotobiorreator que produz alga e oxigênio e, além disso retira o dióxido de carbono, promovendo um sistema de apoio à vida para astronautas em viagens exploratórias de longo prazo associado à produção de alimentos.

Ugwu *et al.* (2008) em seu artigo de revisão, discute a produção de vários

modelos construtivos de fotobiorreatores para produção específica de certos tipos de algas. Mostrando novamente que a produção de algas em fotobiorreatores é promissora, principalmente em laboratórios e pequenas plantas experimentais, contudo, são poucos os modelos que podem ser extrapolados e construídos em escala comercial e, ainda devem ser melhor estudados de forma que obtenham um maior aproveitamento e rendimento.

A bibliografia apresentada refere-se à introdução de pesquisas referentes a sistemas de cogeração e trigerção e à produção de microalgas. Não foram encontradas pesquisas que relacionam os dois temas, tampouco foram observados estudos relacionados ao aproveitamento das emissões de gases de combustão de motores a Diesel para o cultivo de microalgas. Desse modo, reafirma-se a relevância do estudo experimental proposto nesta dissertação, cujo propósito é contribuir para o estudo da multigerção, demonstrando a viabilidade de um sistema autossustentável e não poluente de geração de energia cujo combustível será um biodiesel produzido a partir de microalgas cultivadas no mesmo local.

Verifica-se, desse modo, que o estudo a respeito de sistemas de trigerção e multigerção, assim como aqueles referentes ao cultivo de algas, apresentam desafios a serem vencidos para a consolidação do processo. Alguns desafios são listados abaixo:

- (i) Considerando-se que os estudos acerca da trigerção concentram-se em demandas muito específicas ou em análises científicas relacionadas ao rendimento termodinâmico ou econômico do sistema sem um vínculo com aplicações práticas, observou-se a necessidade de maior quantidade de estudos relacionados com demandas práticas, porém passíveis de serem extrapoladas para casos mais gerais – como a produção de microalgas, a geração combinada de eletricidade, calor e frio em conjuntos habitacionais ou em hotelaria em locais com elevada amplitude térmica anual – com a finalidade de disseminar essa prática no ambiente socioeconômico mundial;
- (ii) Associar o estudo da trigerção a outras pesquisas relacionadas com o aumento da eficiência de sistemas termodinâmicos e com a redução de impactos ambientais mediante a redução das emissões de gases estufa e do já mencionado aumento da eficiência desses sistemas, inserindo essas

- pesquisas no contexto do estudo de biocombustíveis;
- (iii) Cultura de microalgas em fotobiorreatores em escala industrial, uma vez que a maior parte da bibliografia analisa esse método de cultivo em escala laboratorial, ou pouco maior;
 - (iv) Desenvolvimento de uma tecnologia nacional de fabricação de tubos transparentes com custo relativamente baixo;
 - (v) Concepção de um fotobiorreator em escala industrial para a produção de microalgas de maneira eficiente e economicamente viável;
 - (vi) Relacionar as demandas das microalgas relacionadas ao aumento de sua taxa de crescimento e da quantidade de lipídios em sua composição relacionadas a um fotobiorreator em escala industrial cuja fonte de carbono sejam as emissões decorrentes da combustão em máquinas térmicas;
 - (vii) Desenvolvimento de métodos de controle de pH, temperatura e luminosidade em fotobiorreatores expostos ao ambiente externo.

2.3 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho dizem respeito às observações realizadas na pesquisa bibliográfica. Essas metas foram selecionadas a partir dos desafios listados. A maior parte dos desafios mencionados é tratada pelo grupo de pesquisa do NPDEAS, do qual faz parte o presente trabalho.

Tem-se como objetivo geral deste estudo o desenvolvimento experimental de um sistema de multigeração, mediante a produção simultânea de calor e energia elétrica com o aproveitamento das emissões resultantes do processo de combustão de diesel para o cultivo de microalgas. O motor a combustão interna aciona um gerador para a produção de energia elétrica e os gases de combustão, oriundos do motor diesel, são fonte de energia térmica, obtida a partir da recuperação do calor que seria rejeitado por intermédio de um trocador de calor. Os gases de exaustão são direcionados a um minifotobiorreator, no qual são cultivadas as microalgas.

Em razão do objetivo geral proposto, de desenvolvimento e análise de um sistema multigerador, tem-se como objetivos específicos:

- (1) Desenvolver um protótipo de sistema multigerador movido a biodiesel;
- (2) Realizar uma análise termodinâmica com a finalidade de avaliar o desempenho do sistema, e
- (3) Avaliar o efeito das emissões do motor Diesel sobre o crescimento das microalgas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema multigerador apresentado destina-se ao aproveitamento do calor residual resultante da geração de eletricidade por um motor a combustão interna e das emissões dos gases de combustão para produzir biomassa de microalgas em um minifotobiorreator. Há o suprimento de eletricidade, calor e dióxido de carbono, com a produção de biomassa, a qual poderá ser usada para a produção de biodiesel. A produção desse biocombustível agrega um novo componente energético ao sistema, que posteriormente será acoplado a um refrigerador por absorção ainda em desenvolvimento. O sistema é composto por um motor Diesel/Biodiesel acoplado a um gerador elétrico, cujas emissões serão aproveitadas pelo minifotobiorreator após recuperar-se o calor residual dos gases de combustão no trocador de calor. O grupo multigerador (Figura 3.1) pode ser dividido fundamentalmente em três subsistemas, os quais serão detalhados em tópicos distintos:

1. Grupo Moto-Gerador
2. Unidade de Aquecimento
3. Minifotobiorreator

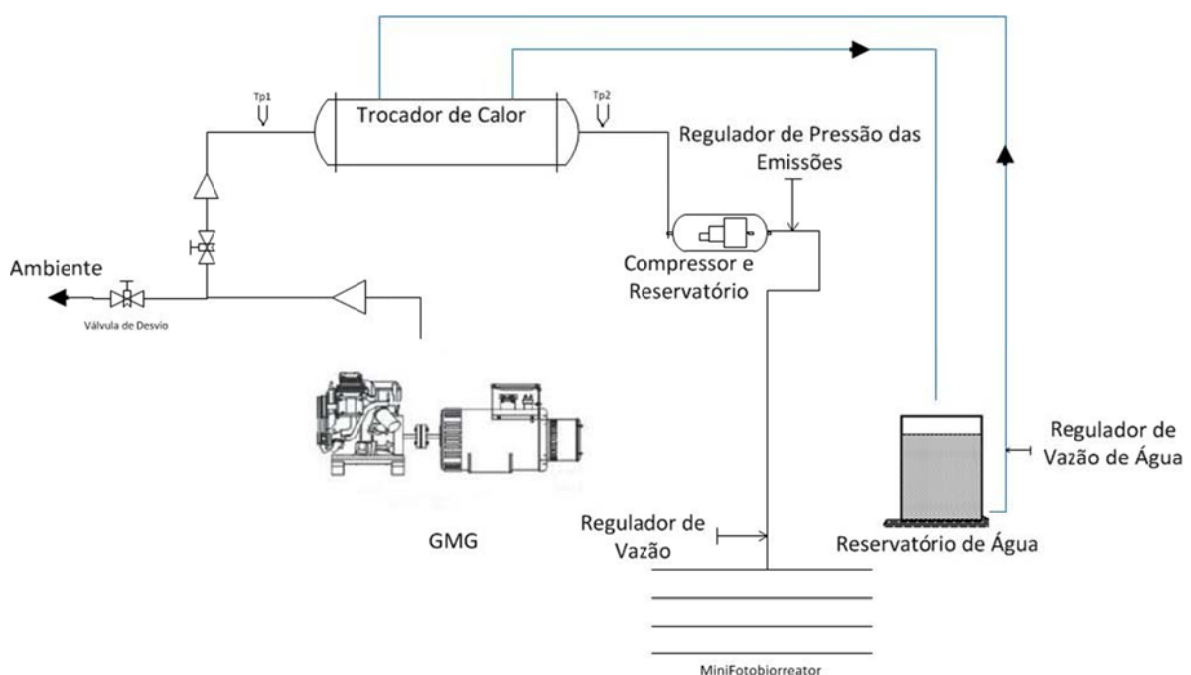


FIGURA 3.1 DIAGRAMA DO GRUPO MULTIGERADOR

3.1 GRUPO MOTO-GERADOR

O grupo moto-gerador é constituído de um motor a diesel/biodiesel e de um gerador de potência elétrica de corrente alternada. O sistema é controlado por uma série de dispositivos elétricos e mecânicos que têm como finalidade prover eletricidade de modo permanente ou em caso de lapsos no fornecimento de energia pela concessionária local. Os componentes do grupo gerador são descritos em subitens específicos descritos na Figura 3.2.

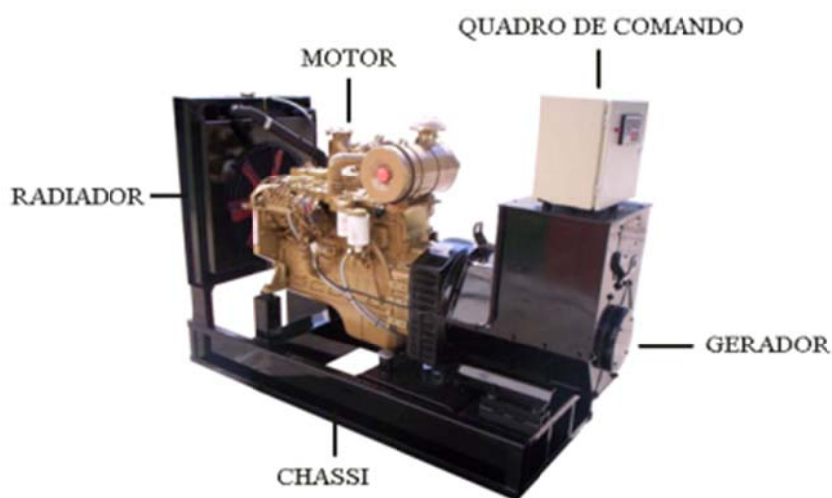


FIGURA 3.2 GRUPO MOTO-GERADOR BATTISTELLA

3.1.1 Gases Emitidos Por Um Motor Diesel

No motor Diesel, a ignição do combustível ocorre pelo contato deste com o ar comprimido em alta temperatura. Forma-se, então, uma mistura de combustível vaporizado e ar que sofre um processo de auto-ignição e de propagação da chama para as áreas adjacentes, no interior da câmara de combustão. O processo de auto-ignição pode ser dividido em quatro etapas, conforme Obert (1971): (i) atraso de ignição, (ii) aumento rápido de pressão; (iii) aumento de pressão constante; e (iv) queima no curso de expansão. A etapa de atraso de ignição corresponde ao tempo entre o início da injeção e o atingimento das condições da reação química de oxidação, correspondendo ao lapso de tempo no qual o combustível é atomizado, vaporizado e misturado com o ar a alta temperatura. Forma-se, então, uma mistura de combustível vaporizado e ar que sofre um

processo não homogêneo de autoignição e de propagação da chama para as áreas adjacentes, no interior da câmara de combustão.

O óleo Diesel é uma mistura de hidrocarbonetos com ponto de ebulição entre 200 e 360 °C. Dois dos principais contaminantes do óleo Diesel são a água e o enxofre. As características do óleo Diesel adequado segundo as normas vigentes estão expostas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 PROPRIEDADES DO ÓLEO DIESEL

PROPRIEDADE	NORMA	ESPECIFICAÇÃO
Viscosidade	ASTM D-445	1,3 a 5,8 CentiStoke a 40 oC
Número de Cetano	ASTM D-613	Mínimo de 40 em condições normais
Teor de Enxofre	ASTM D-129	Menor que 1,0% em peso
Teor de água e de sedimentos	ASTM D-1796	Menor do que 0,1% em peso
Ponto de fulgor	ASTM D-93	Mínimo de 52 °C
Ponto de névoa	ASTM D-97	12 °C abaixo da temperatura de operação

Durante o processo de combustão, uma grande quantidade de compostos químicos é formada. Os principais componentes dos gases de combustão são o dióxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, materiais particulados (fuligem) e hidrocarbonetos não queimados.

O monóxido de carbono é particularmente importante por ser tóxico para o cultivo de microalgas, no entanto as emissões deste componente em um motor diesel são naturalmente baixas, aumentando apenas no caso de o motor atuar no limite de sua capacidade. O monóxido de carbono, no processo de combustão, é formado a partir de uma reação de combustão incompleta, que ocorre devido à falta de oxigênio durante a combustão. A formação de CO tem ainda o efeito de aumentar as emissões de NO_x.

A formação de óxidos de nitrogênio no processo de combustão ocorre pela reação do gás nitrogênio, que corresponde a 76,65% do ar, com o Oxigênio e ocorre a temperaturas acima de 1726 °C. A formação desses óxidos é praticamente inevitável nos motores Diesel, pois aumentam conjuntamente com o aumento da eficiência

termodinâmica do motor. A influência dos óxidos de nitrogênio, entretanto, não influencia negativamente o desenvolvimento das microalgas.

Os materiais particulados são compostos, conforme Majewsky (2006), de partículas de carbono, óxidos resultantes da queima de aditivos e lubrificantes e da corrosão do motor. Como a maior parte da fuligem é composta de carbono, espera-se que esta não influencie negativamente no crescimento das algas, porém provavelmente ocorrerá uma redução do pH.

3.1.2 Motor Utilizado

A máquina térmica acoplada ao grupo gerador é um motor Diesel de seis cilindros da marca MWM, com a designação TBD 229 EC 6 (Figura. 3.3).

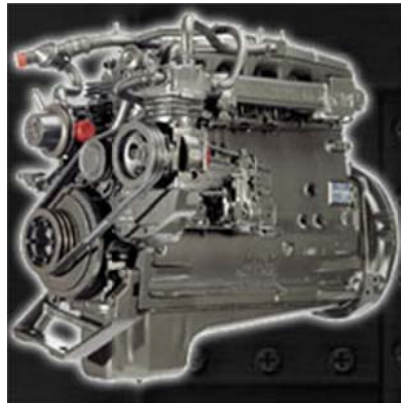


FIGURA 3.3 MOTOR DIESEL MWM 229

O motor utilizado tem as suas principais características apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - DADOS TÉCNICOS DO MOTOR MWM 229

<u>Designação</u>	<u>TBD 229 EC 6</u>
<u>Tipo de construção</u>	<u>Diesel - 4 tempos - em linha</u>
<u>Tipo de injeção</u>	<u>Injeção Direta</u>
<u>Diâmetro x Curso do pistão</u>	<u>102 x 120 mm</u>
<u>Cilindrada Unitária</u>	<u>0,980 litros</u>
<u>Número de Cilindros</u>	<u>6</u>
<u>Aspiração</u>	<u>Turbo</u>
<u>Primeiro Cilindro</u>	<u>Lado do Volante</u>
<u>Ordem de ignição</u>	<u>1-5-3-6-2-4</u>
<u>Sentido de Rotação</u>	<u>Anti-horário (Lado do Volante)</u>
<u>Peso seco</u>	<u>635 kg</u>
<u>Taxa de compressão</u>	<u>15,9:1</u>
<u>Pressão de compressão (motor novo)</u>	<u>21 bar (na rotação mínima de 200 rpm)</u>
<u>Pressão de compressão (motor usado)</u>	<u>19 bar (na rotação mínima de 200 rpm)</u>
<u>Sistema de Lubrificação</u>	
<u>Pressão de óleo (mínimo)</u>	<u>3,0 bar (motor quente)</u> <u>1,0 bar (marchalenta)</u>
<u>Temperatura do óleo</u>	<u>90 – 110 °C (operação normal)</u> <u>125 (máximo)</u>
<u>Volume de óleo</u>	<u>13 litros (máximo, com filtro)</u> <u>7 litros (mínimo, com filtro)</u>
<u>Volume do filtro</u>	<u>0,5 litros</u>
<u>Consumo Máximo de óleo</u>	<u>0,5% do combustível consumido</u>
<u>Sistema de Arrefecimento</u>	
<u>Volume de Água</u>	<u>9 litros (sem radiador)</u>
<u>Temperatura da água</u>	<u>80 - 95 °C (operação normal)</u> <u>100 °C (máxima)</u>
<u>FONTE: MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO MWM INTERNATIONAL MOTOS</u>	

3.1.3 Gerador Elétrico

Geradores são máquinas que têm a finalidade de converter energia mecânica em energia elétrica. Essa transformação tem como fundamento o princípio físico indicado na Lei de Lenz: “quando há indução magnética, a direção da força eletromotriz induzida é tal, que o campo magnético dela resultante tende a parar o movimento que produz a força eletromotriz”. Para induzir uma força eletromotriz, o movimento do rotor gera um campo magnético. O sistema de excitação deve manter uma rotação constante para manter estável a tensão de saída do alternador. Torna-se necessário, desse modo, um sistema de regulador de tensão para regular o sistema de excitação.

A regulação da velocidade é crítica para o funcionamento adequado do gerador, pois a frequência da tensão gerada no alternador deve ser mantida aproximadamente constante. O motor Diesel, dessa forma, deve operar em rotação constante, independentemente das solicitações de carga, que variam conforme a demanda suprida pelo gerador. Um governador ou regulador de rotações deve corrigir a quantidade de combustível injetada conforme a potência requerida sem permitir grandes variações na rotação. Trata-se de um sistema de redução e aumento da rotação do rotor do atuador conforme a carga requerida do gerador.

O gerador usado no sistema é um Gerador Síncrono, Linha G, da marca WEG. Esse gerador tem acoplado a ele e ao motor diesel um regulador eletrônico de tensão, que tem a finalidade de manter a frequência em 60 Hz. As características construtivas do motor constam na Figura 3.4.

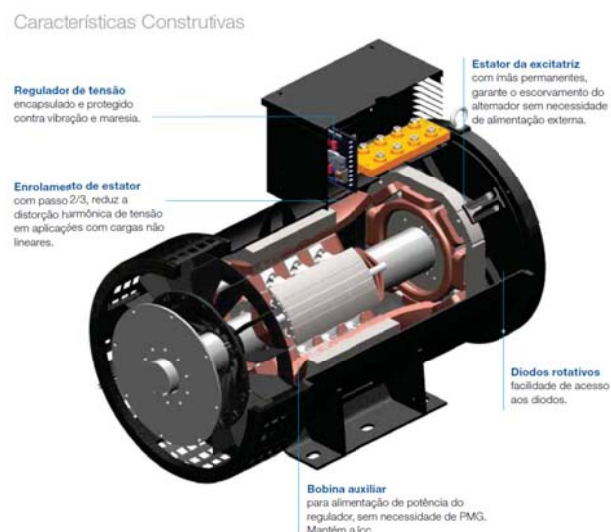


FIGURA 3.4 ALTERNADOR WEG LINHA G

3.1.4 GRUPO GERADOR BATTISTELLA/MAQUIGERAL 12W6A

O grupo moto gerador foi instalado na casa de máquinas do edifício NPDEAS pela empresa Battistella/Maquigeral (Figura 3.5). O motor a Diesel foi adaptado pela referida empresa para o consumo de biodiesel e diesel em qualquer proporção. Outro acréscimo ao sistema foi o acoplamento de um Quadro de Transferência Automática (QTA), o qual não demanda nenhuma intervenção para acionar o grupo gerador em caso de falta de suprimento de energia elétrica externa. Esse sistema é controlado por um módulo de monitoramento da tensão principal que atua de modo a efetuar o procedimento de partida do motor e alimentar a carga elétrica requerida em caso de falta de energia elétrica.



FIGURA 3.5 GRUPO GERADOR INSTALADO

Um módulo microprocessado de controle e proteção denominado USCAMAQ-21 monitora o grupo moto-gerador, provendo dados acerca da rotação, tensão, potência demandada, número de partidas e horas de operação. O painel do USCAMAQ-21 (Figura 3.6) serve de interface com o usuário, a partir do qual o grupo moto-gerador pode ser acionado em caso de falha no quadro de transferência automático ou de se desejar acionar o grupo moto-gerador e tornar o prédio independentemente da rede elétrica externa.



FIGURA 3.6 MÓDULO USCAMAQ-21

3.2 TROCADOR DE CALOR

Um trocador de calor é um dispositivo que tem a finalidade de realizar a troca térmica entre dois fluidos em temperaturas diferentes. Há diversos tipos de trocadores de calor disponíveis. A escolha desse componente depende da aplicação a que se destina. Na Figura 3.7, ilustram-se os tipos de trocador de calor existentes conforme o tipo de troca térmica e de modelo construtivo.

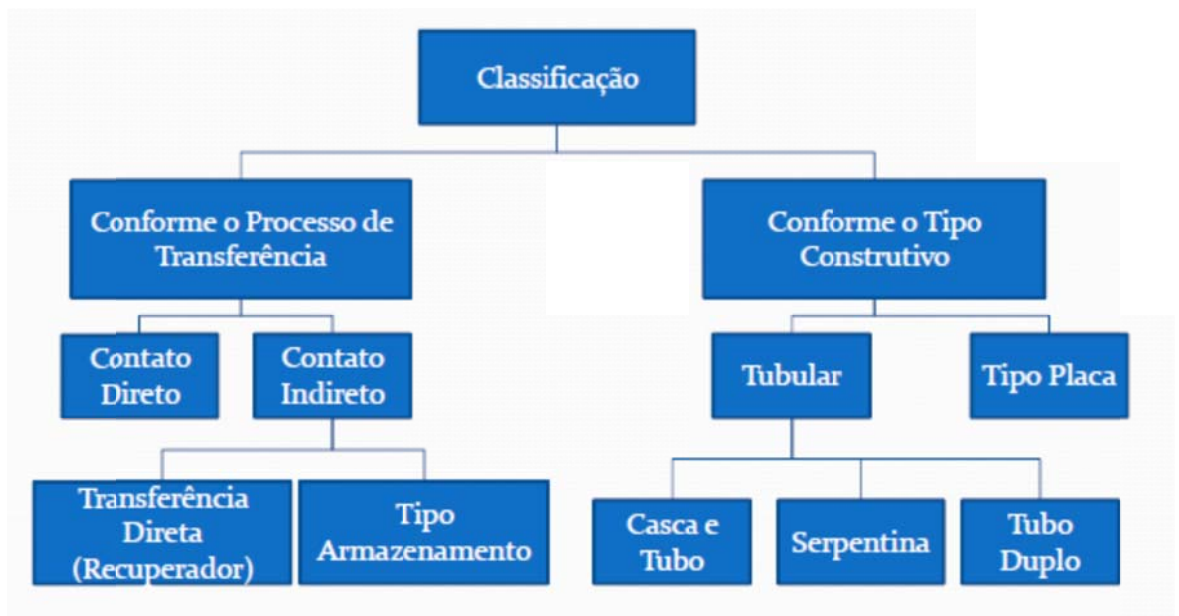


FIGURA 3.7 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Considerando os tipos de trocador de calor existentes, constata-se que o de tipo casco e tubo tem a possibilidade de ter alta eficiência térmica e de trabalhar em alta pressão

e temperaturas. Normalmente, o fluido frio circula pela carcaça e o fluido quente percorre o interior dos tubos internos. A troca térmica ocorre pelo contato dos tubos internos com o fluido frio. Esse tipo de trocador de calor pode ser classificado conforme o número de passes que os tubos internos percorrem no interior da carcaça.

O trocador de calor do tipo casca e tubo foi dimensionado conforme a equação de troca de calor, as temperaturas almeçadas das saídas e entradas do trocador de calor e o coeficiente global de troca térmica (fornecido pela empresa Apema para a troca térmica entre gases quentes e fluido frio a pressão ambiente):

$$Q = UA\Delta T_m \quad (1)$$

Sendo que a temperatura média logaritimica equivale a:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (2)$$

Onde:

$$\Delta T_1 = T_{efq} - T_{sff} \quad (3)$$

e

$$\Delta T_2 = T_{sfq} - T_{eff} \quad (4)$$

De modo que:

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_m} \quad (5)$$

Como:

$$T_{efq} = 250 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{sfq} = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{sff} = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{eff} = 25 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$U = 70 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Desse modo, teve-se seguinte área de troca térmica:

$$A = 3,87 \text{ m}^2$$

Dessa forma, o trocador de calor selecionado para o sistema multigerador, ilustrado na Figura 3.8, consiste em um trocador do tipo casca e tubo de único passe – para reduzir as restrições na saída dos gases de combustão do motor Diesel – da marca Apema, modelo TST 175-5-1-A. Esse modelo tem casco feito em tubo de aço carbono com costura longitudinal. Os espelhos são executados em chapas de aço carbono e os feixes tubulares em aço inoxidável, com área de troca térmica de 3,98 metros quadrados. As tampas foram fabricadas em aço carbono e soldadas à casca, com a finalidade de resistir melhor a altas temperaturas.



FIGURA 3.8 TROCADOR DE CALOR APEMA MODELO TST 175-5-1-A

3.3. MINIFOTOBIORREATOR

Primeiramente, no que concerne ao nome desse equipamento (Figura 3.9), algumas explicações são necessárias. Deve-se mencionar que sua denominação decorre do fato de ser uma versão conceitual e compacta, com volume de 60 litros, de um fotobiorreator de 8 m^3 construído na adjacência do edifício NPDEAS pelo mesmo grupo. Geralmente um fotobiorreator dessa dimensão não é tratado como uma miniatura na bibliografia.



FIGURA 3.9 MINIFOTOBIORREATOR

A finalidade do equipamento ilustrado na Figura 3.9 é realizar avaliações acerca dos resultados esperados no fotobiorreator em escala industrial. Com esse propósito, o dispositivo foi construído com os mesmos componentes de sua versão em maior escala. Foram utilizados os mesmos tubos, a mesma bomba hidráulica e simulou-se a intensidade luminosa da exposição solar a que o equipamento maior está submetido durante o dia, porém sem interrupção no fornecimento de luz. Dessa forma, criou-se um ambiente relativamente mais inóspito à proliferação de microalgas, uma vez que, sendo esse equipamento 133 vezes menor do que o FBR, a inserção de calor no meio de cultivo pela bomba, assim como a recirculação na mesma. Amplia-se, portanto, a inserção de gradientes térmicos no sistema e o estresse hidrodinâmico ao qual estão submetidas as microalgas.

O mFBR tem como constituintes principais a tubulação transparente, a bomba hidráulica e o sistema de iluminação. Trata-se, conforme mencionado de uma versão conceitual e em escala reduzida do fotobiorreator construído no NPDEAS (Figura 3.10), construído para realizar testes operacionais no cultivo de microalgas em um ambiente potencialmente mais hostil, de modo a antecipar problemas relativos ao cultivo industrial de microalgas, objetivo final do projeto do FBR.



FIGURA 3.10 FOTOBIORREATOR NPDEAS

O minifotobiorretator tem como seu principal componente a tubulação transparente. Atualmente, não há fabricantes comerciais de tubos transparentes feitos de PVC. Desse modo o desenvolvimento dos tubos rígidos de PVC transparente foi realizado pelo grupo NPDEAS em conjunto com a empresa Darthel, nas dimensões da Figura 3.11.

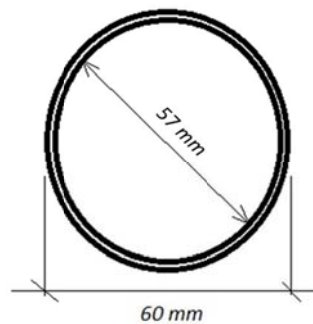


FIGURA 3.11 DESENHO ESQUEMÁTICO DA TUBULAÇÃO DE PVC TRANSPARENTE

No que se refere à bomba hidráulica utilizada, para Vandanjon *et al.* (1999), o ideal seria utilizar um equipamento de características diferenciadas, que promovesse menor dano às células da microalgas, como uma bomba de palhetas, contudo não foi encontrado no mercado um produto com tais características, sendo esse o principal motivo pela adoção de uma bomba centrífuga. A bomba acoplada ao minifotobiorreator é a do fabricante Dancor, com motor de $\frac{1}{4}$ cv, modelo CAM-W4C, cujas características são: tensão de trabalho 220V, rotação de 3450rpm, máxima altura de elevação de 24m.c.a. e vazão máxima de 9,4m³/h). Os materiais que constituem a bomba, o rotor e a carcaça, também podem interferir no crescimento das microalgas. O rotor da bomba é feito de um material denominado *noryl*, um termoplástico de engenharia de elevada resistência e praticamente inerte, de modo que não reage com o meio de cultivo. O mesmo ocorre com a carcaça, feita de uma liga especial de alumínio-silício. A Figura 3.12 apresenta a bomba utilizada.



FIGURA 3.12 BOMBA CENTRÍFUGA DANCOR MODELO CAM-W4C

A iluminação é realizada por uma série de lâmpadas fluorescentes. Essas fontes luminosas fornecem luminosidade com comprimentos de onda concentrados na faixa entre 500 e 650 nm, com picos na faixa entre 450 e 400 nm, dentro da faixa de comprimentos de onda consideradas ideais para o crescimento de microalgas por Leher *et al.* (2009), que é entre 400 e 700 nm. A intensidade luminosa fornecida foi de 5500 lux, simulando-se a luz do dia, mediante o uso de lâmpadas fluorescentes de 40W.

O suprimento de ar comprimido é realizado pelo compressor da marca Ingersoll-Rand, modelo 15T2, conforme a Figura 3.13. Esse equipamento tem capacidade nominal de até 1000 psig e vazão de 8,1m³/h a 51,96 m³/h.



FIGURA 3.13 COMPRESSOR DE AR INGERSOLL-RAND MODELO 15T2

Quando houver fornecimento dos gases de combustão para o minifotobiorreator, o suprimento desses gases é realizado pelo compressor da marca Schulz, modelo MSV40, ilustrado na Figura 3.14. Os gases de combustão do grupo moto-gerador são armazenados no cilindro do compressor.



FIGURA 3.14 COMPRESSOR DE AR SCHULZ MSV 40

A regulação do suprimento de emissões capturadas do grupo moto-gerador foi realizada por intermédio de uma válvula reguladora de pressão (Figura 3.15), de modo a manter constante a pressão de entrada no mFBR, e, dessa forma, permitir uma vazão de saída constante do compressor.



FIGURA 3.15 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO UTILIZADA

Este sistema compreende ainda um módulo para resfriamento, um trocador de calor no interior do qual recircula água a temperatura ambiente com a finalidade de manter relativamente estável a temperatura no interior do minifotobiorreator. O objetivo é mitigar a tendência de aumento da temperatura de funcionamento do mFBR e, simultaneamente, facilitar a remoção do O_2 no *degasser* representado esquematicamente na Figura 3.16.

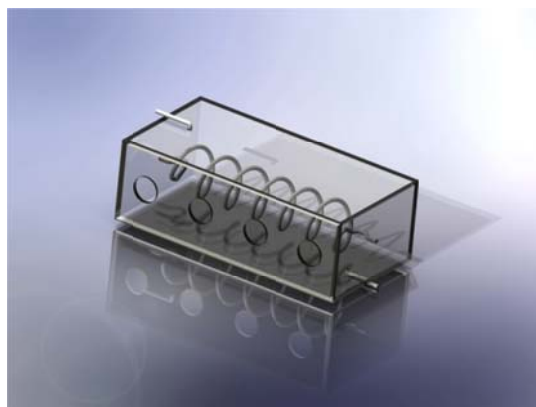


FIGURA 3.16 REPRESENTAÇÃO DE UM MÓDULO GASSER/DEGASSER

No módulo acima representado, é injetado o dióxido de carbono no meio de cultivo, mediante a adição de ar ou das emissões do grupo gerador, enquanto ocorre a remoção do excesso de O_2 produzido pelas microalgas durante o tempo no qual circulam no interior da tubulação transparente. Dentro do trocador de calor aletado no interior do *degasser*, ocorre a circulação de água a temperatura ambiente. A eliminação do O_2 é facilitada pela variação de pressão entre a tubulação e o *degasser*. O fluido ao entrar no reservatório do *degasser*, experimenta uma redução na velocidade de escoamento e um gradiente positivo da pressão e da temperatura, facilitando a dissolução do CO_2 no meio de cultivo e a eliminação do O_2 excedente.

As válvulas usadas para direcionar os gases de combustão do motor diesel são válvulas registro modificadas, ilustradas na Figura 3.18. As peças não metálicas foram substituídas, de modo a garantir a resistência da peça a altas temperaturas.



FIGURA 3.18 VÁLVULA DIRECIONAL

3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados é realizada de duas formas. Uma por intermédio da aquisição de dados e outra mediante procedimentos laboratoriais. O sistema de aquisição de dados é usado para a medição das variáveis termodinâmicas do processo, realizados automaticamente. Os procedimentos laboratoriais para a aquisição de dados dependem da intervenção humana e referem-se à medição da quantidade e das características dos meios de cultivo analisados.

O sistema de aquisição de dados (Figura 3.19) é constituído de um computador montado em gabinete próprio para acomodação de equipamentos eletrônicos e de telecomunicações, fabricado pela Nilko. Nesse compartimento aloja-se o computador, no interior do qual foram instaladas duas placas da National Instruments, uma de controle e outra Multímetro, capaz de realizar 60 leituras/s de dados de tensão, corrente e/ou medição de resistência em dois, três ou quatro fios. Por intermédio da placa multímetro são realizadas as leituras de todo o conjunto de sensores instalados. Uma rotina desenvolvida no programa computacional LABVIEW armazena e manipula os dados recebidos.



FIGURA 3.19 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A medição de temperatura é realizada por termistores. Esses componentes apresentam grande variação de resistência elétrica quando seu corpo é submetido a variações de temperatura. Então, é possível fazer leituras de temperaturas com a variação da resistência elétrica destes componentes, bastando calibrá-los em função de temperaturas conhecidas. Estes pontos conhecidos de temperatura são proporcionados por equipamentos chamados de Banhos Termostáticos. O equipamento utilizado foi o modelo 521-3dc, utilizado pelo NPDEAS, fabricado pela Nova Ética e apresenta faixa de trabalho que varia de -40°C a 200°C , com resolução de leitura de $0,1^{\circ}\text{C}$. Este equipamento possui certificado de calibração RBC e validação física, referente a distribuição de temperatura em sua cuba, com relatório emitido pelo fabricante. O termistor é um semicondutor cerâmico,

encapsulado, com uma cobertura de resina epóxi. O modelo utilizado é o 44031RC, fabricado pela Measurement Specialties, que tem as características de operação apresentadas no Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DO TERMISTOR 44031RC
Resistência a 25°C: 10.000 Ohms
Incerteza de medição (0°C a 70°C): $\pm 0,1^\circ\text{C}$
β (25°C a 85°C): 3978 K
Tolerância de β : 0,4%
Tempo de resposta ao ar: menor que 10 segundos

As dimensões do termistor são reduzidas, facilitando a sua inserção ou o seu uso em acoplamentos e contatos em superfícies que deverão ter sua temperatura medida. A Figura 3.20 ilustra o termistor utilizado para medir temperaturas até aproximadamente 100 °C.

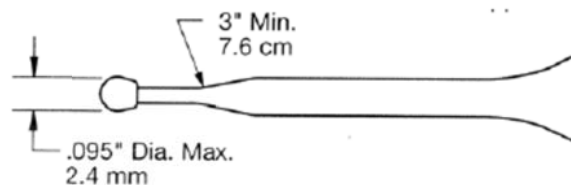


FIGURA 3.20 DIMENSÕES DO TERMISTOR 44031RC

Os termopares utilizados para monitorar as altas temperaturas dos gases de exaustão são do tipo K, compostos da liga Cromel/Alumel. Esse componente tem faixa de operação entre 200 e 1250 °C.

A potência elétrica consumida é medida pelo módulo USCAMAQ-21, acoplado ao grupo moto-gerador. A vazão de combustível é medida mediante o uso de uma escala graduada no reservatório de combustível.

No caso da medição da vazão dos gases de combustão do motor diesel, toma-se a velocidade de escoamento na saída das emissões por intermédio de um anemômetro digital de pás rotativas modelo HHF 300 A (OMEGA Engineering INC) com faixa de operação de 0 a 35 m/s, com limite intrínseco da velocidade $\pm 2,5\%$ da leitura.

Para a medição dos fluxos de água, utilizou-se um medidor de vazão da marca OMEGA, modelo FL-6315ABR, exposto na Figura 3.21, sendo o limite intrínseco de precisão de $\pm 2,0\%$ da leitura, com uma repetibilidade de $\pm 1,0\%$. As medições são registradas por leitura visual.



FIGURA 3.21 MEDIDOR DE VAZÃO OMEGA FL-6315ABR

Como o crescimento das microalgas expressa o incremento de tamanho de uma população e não do desenvolvimento de um indivíduo, além do emprego da densidade celular, é também possível construir as curvas de crescimento empregando outras informações como: biomassa, absorvância (espectrofotômetro) e teor de pigmentos, por exemplo (ABALDE *et al.*, 1995). Visando o máximo aproveitamento do fotobiorreator durante a fase de crescimento da microalga, deve-se determinar o melhor ponto ou a melhor circunstância para realizar a colheita da mesma. Este ponto ocorre quando o crescimento exponencial cessa e há uma estabilização na multiplicação celular.

Desse modo, para analisar o desenvolvimento das algas, foram medidos diariamente o pH, a temperatura e a absorvância do meio de cultivo. Além dessas medidas, foi realizada uma análise da biomassa seca no início e no final do cultivo para obter-se a biomassa gerada no processo de crescimento e multiplicação das microalgas.

A medição do pH foi realizada por intermédio de um pHmetro digital microprocessado da marca Gehaka, modelo PG1800, ilustrado na Figura 3.22. Trata-se de um equipamento laboratorial que opera entre 0,00 e 14,00 de pH, com resolução de 0,01



FIGURA 3.22 pHMETRO DIGITAL PG1800

A absorvância dos meios de cultivo, que tem a finalidade de medir a densidade da população de algas no meio de cultivo, observa a Lei de Lambert-Beer, segundo a qual há uma proporcionalidade entre a concentração celular regida por uma relação direta entre o coeficiente de extinção molar, a concentração e a distância que a luz tem que percorrer na amostra, conforme a equação abaixo:

$$\alpha = \epsilon \cdot c \cdot l \quad (6)$$

A absorvância foi aferida por meio de um espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo UV-1800, conforme a Figura 3.23. Esse equipamento opera com faixas de comprimento de onda entre 190 a 1100 nm, com resolução de 1nm. As medições foram tomadas para um comprimento de onda de 540,0 nm, mediante o uso de uma cubeta de 1 cm de distância.



FIGURA 3.23 ESPECTROFOTÔMETRO UV-1800

A biomassa seca produzida foi medida por meio de um processo de filtração à vácuo. Nesse procedimento, 100 mL do meio de cultivo são filtrados, floculados e posteriormente secados em uma estufa a 60 °C por 24 horas. Desse modo, mede-se a diferença entre a massa filtrada antes e depois da secagem, que é a biomassa seca.

3.5 ANÁLISE TERMODINÂMICA

A análise termodinâmica do sistema de multigeração tem como finalidade definir as particularidades e o rendimento do sistema. Desse modo, são estudados os efeitos do fornecimento das emissões do motor diesel sobre o crescimento das microalgas, com o objetivo de produzir biodiesel, da recuperação do calor residual do motor pelo redirecionamento dos gases de combustão para um trocador de calor e da produção de energia elétrica pelo grupo moto-gerador. O grupo multigerador supre três demandas energéticas, com a possibilidade de acoplá-lo a um refrigerador por absorção ainda em desenvolvimento no NPDEAS.

A energia elétrica suprida pelo sistema é aquela demanda pelo prédio NPDEAS, por intermédio do funcionamento do grupo moto-gerador. A potência elétrica demandada é medida considerando-se os dados obtidos a partir do painel USCAMAQ-21, acoplado ao

grupo moto-gerador, mediante o cálculo da potência elétrica a partir da voltagem e da amperagem demandadas, conforme a fórmula de cálculo de potência elétrica abaixo:

$$\dot{W}_{ele} = V \cdot I \quad (7)$$

O calor fornecido à água no trocador de calor é passível de ser calculado por intermédio do conhecimento da vazão mássica de água e das temperaturas de entrada e de saída da água no trocador de calor, além do calor específico da água. Desse modo, o calor recuperado pelo trocador de calor, transferido à água, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\dot{Q}_{aq} = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot (T_s - T_e) \quad (8)$$

Os gases emitidos pelo processo de combustão do motor Diesel são aproveitados para auxiliar no crescimento das microalgas. Dessa forma, agrega-se um novo componente energético ao sistema, relacionado à produção de biomassa e sua conversão em biodiesel. Esse novo fluxo de energia relaciona-se ao fluxo de biodiesel produzido e o poder calorífico desse combustível conforme a relação abaixo:

$$\dot{Q}_{bm} = \dot{m}_{biod} \cdot PCI_{biod} \quad (9)$$

A referência do rendimento do sistema multigerador é o fonte energética primária do sistema, o poder calorífico do combustível do motor diesel. Assim, calcula-se a energia que move o sistema multigerador relaciona a vazão mássica de combustível e o poder calorífico inferior do Diesel ou biodiesel fornecido, conforme a fórmula abaixo:

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb} \quad (10)$$

Considerando-se os componentes energéticos relacionados, o rendimento termodinâmico do sistema relaciona as energias elétrica, térmica e o poder calorífico produzidos pelo sistema multigerador à quantidade de energia primária fornecida pelo combustível que move o sistema. Dessa forma, tem-se o rendimento do sistema multigerador:

$$\eta_{SM} = \frac{\dot{W}_{ele} + \dot{Q}_{aq} + \dot{Q}_{biod}}{\dot{Q}_{comb}} \quad (11)$$

3.6 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A análise termodinâmica realizada foi feita no sistema multigerador conforme a Figura 3.24. Foram instalados termopares (Tp) e termistores (Tm) na entrada e na saída de gases de combustão e de água no trocador de calor para a obtenção de dados de temperatura dos fluidos. Após o acionamento do grupo moto-gerador (GMG), os gases de combustão percorrem o interior do trocador de calor são armazenados no reservatório do compressor e enviados o minifotobiorreator. A água aquecida no trocador de calor é armazenada em um reservatório, sendo que a medição de suas temperaturas na entrada e saída do fluido no trocador de calor é realizada por termistores.

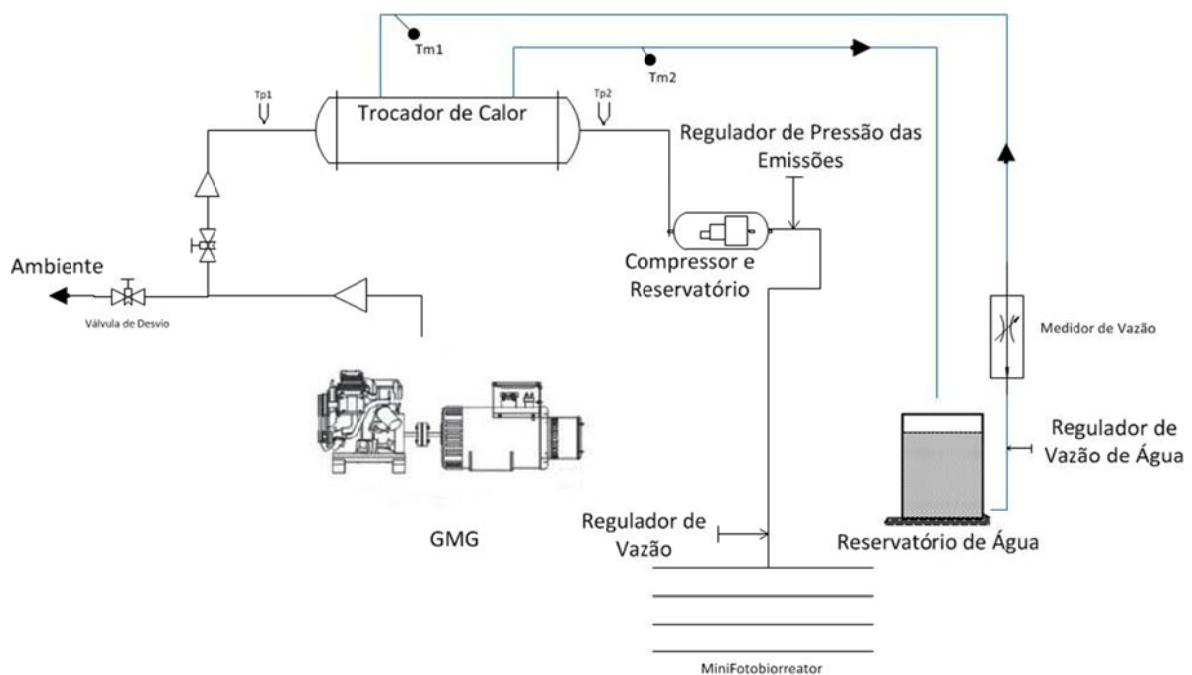


FIGURA 3.24 DIAGRAMA DO SISTEMA MULTIGERADOR

Os gases de combustão armazenados no reservatório do compressor alimentam o minifotobiorreator com dióxido de carbono. Nesse equipamento, inserem-se um meio de cultivo e uma quantidade de microalgas, estas inoculadas em proporção 20% do volume

total do meio. As medidas relacionadas ao crescimento das microalgas são realizadas diariamente por intermédio de um espectrofotômetro, que possibilita o conhecimento da taxa de crescimento das algas e, dessa forma, da biomassa gerada. Adicionalmente, foram tomadas medidas do pH e da temperatura do meio de cultivo.

Antes de cada experimento, deve ser realizada a limpeza química do mFBR, eliminando contaminantes e organismos indesejados no sistema e preparando para o cultivo das microalgas. Com essa finalidade, o mFBR é preenchido com água, à qual é adicionado hipoclorito de sódio em proporção de 10 a 12% em relação ao volume do equipamento. Após a circulação por um dia, adiciona-se tiosulfato de sódio para neutralizar a solução. Posteriormente, adiciona-se os nutrientes necessário para conformar-se o meio de cultivo das microalgas.

Adicionalmente, realizou-se o cultivo das microalgas em galões de 20 litros, com a finalidade de comparar resultados e de proceder a análise dos efeitos das emissões sobre o cultivo de microalgas. Os procedimentos são equivalentes àqueles relacionados ao minifotobiorreator no que concerne à esterilização e à aquisição de dados. O meio de cultivo das microalgas adicionado foi o Chu modificado, conforme Oliveira (2010) e a luminosidade foi de 5500 lux, com o propósito de simular a luz do dia, com fotoperíodo de 24 horas.

Os cultivos foram realizados à temperatura ambiente, não em um ambiente controlado. O objetivo foi simular uma situação real de operação do fotobiorreator, de modo que seja possível observar os efeitos esperados das emissões sobre as microalgas.

As algas utilizadas foram coletadas em um parque de Curitiba – Paraná, coletadas, isoladas e cultivadas pelo grupo NPDEAS. Essas algas já são parte do ecossistema local, o que evita maiores problemas com contaminação em caso de vazamento. Outra espécie de alga foi a *Scenedesmus sp.*

3.7 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Uma análise de incertezas é essencial para a adequada avaliação dos resultados obtidos. Por intermédio da aferição experimental de dados termodinâmicos de temperatura, vazão mássica, potência elétrica e consumo de combustível e, ainda, dos dados relativos à biomassa produzida, obtém-se os resultados do presente trabalho. Esses resultados contém uma incerteza intrínseca ao processo experimental, que é quantificada e demonstrada.

Todas as medidas foram tomadas em triplicata. O limite de precisão foi computado como sendo o dobro do desvio padrão das referidas medições, com um grau de confiança de 95%. Os critérios de propagação de erros em medições experimentais seguem os padrões ASME (1993). Da mesma forma, os limites de precisão intrínsecos dos termistores, dos medidores de vazão, do pHmetro e do espectrofotômetro foram considerados desprezíveis em comparação ao limite de precisão das variáveis analisadas. Destarte, as incertezas das medidas de temperatura, pH e absorvância foram calculadas pela equação (11) e a incerteza da taxa de transferência de calor, pela equação (12):

$$\frac{U_{\Delta x}}{\Delta x} = \sqrt{\left(\frac{P_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{B_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2} \cong \frac{P_{\Delta x}}{\Delta x} \quad (12)$$

$$\frac{U_{\dot{Q}}}{\dot{Q}} = \sqrt{\left(\frac{P_{\dot{m}}}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{P_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{P_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \cong \frac{P_{\Delta T}}{\Delta T} \quad (13)$$

Ao analisar-se as equações, observa-se que o cálculo das incertezas depende predominantemente do limite de precisão. As medidas de vazão e temperatura apresentaram grau de confiança de aproximadamente 95%. O valor mais significativo das incertezas foi relacionado às medidas de absorvância, que chegou a aproximadamente $\pm 7\%$, devido às características particulares dessa medição, relacionada à amostra coletada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS REFERENTES AO CULTIVO DE MICROALGAS

Inicialmente, realiza-se a análise dos cultivos de microalgas, pois depende do conhecimento do ciclo de vida das microalgas, do período de maior crescimento e da produção de biomassa a capacidade do sistema de produzir biodiesel. Com essa finalidade, analisou-se a biomassa produzida – por intermédio de medições de absorvância – dos experimentos realizados. Foram observados os crescimentos das microalgas em meio estacionário – em galões – e no minifotobiorreator, com a adição de ar e com a adição das emissões geradas pelo motor Diesel. No cultivo em galões de 20 litros, foram realizados cultivos tanto com as algas coletadas localmente pelo grupo NPDEAS como para a microalga *Scenedesmus sp.*; no fotobiorreator conceitual, somente foram cultivadas as algas coletadas pelo NPDEAS.

Na Figura 4.1, o gráfico ilustra o crescimento das microalgas a partir das medições da absorvância das microalgas *Scenedesmus sp.* em galão com a adição de ar como fonte de carbono. Ao analisar-se a curva de crescimento, observa-se um constante aumento da biomassa produzida até o sexto dia do cultivo – quando houve um decréscimo da absorvância, possivelmente relacionado a um erro de medição ou à inserção de algum contaminante no meio – e uma recuperação acelerada dia posterior, seguido de um período de estabilidade na população de microalgas, à qual se seguiria um decréscimo na população devido ao exaurimento dos nutrientes do meio de cultivo.

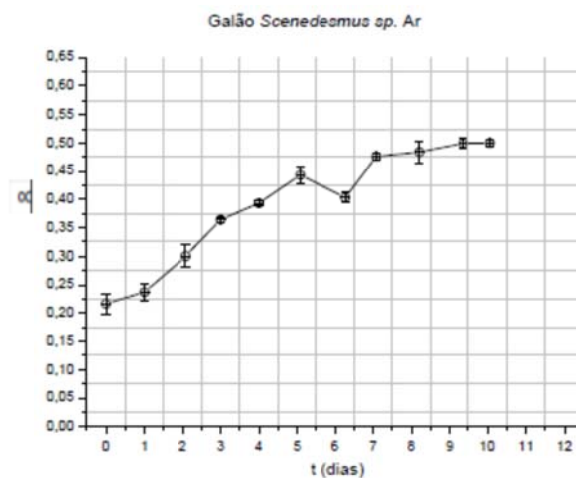


FIGURA 4.1 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA *Scenedesmus sp.* COM A ADIÇÃO DE AR EM GALÃO

Na Figura 4.2, ilustram-se a curva de absorvância das microalgas *Scenedesmus sp.* com a adição dos gases de combustão do motor Diesel acoplado ao sistema multigerador. Primeiramente, verifica-se um crescimento mais intenso e constante das microalgas, o que se relaciona ao fato de que as emissões do motor Diesel conterem proporções significativamente maiores de dióxido de carbono do que o ar.

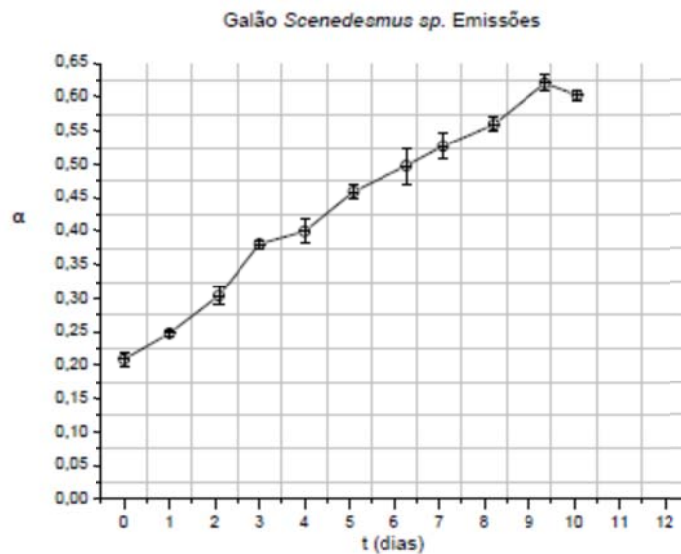


FIGURA 4.2 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA *Scenedesmus sp.* COM A ADIÇÃO DAS EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM GALÃO

Observa-se, ainda, que, apesar de o ciclo de vida da alga – considerando-se o período de crescimento e de estagnação deste – ter sido maior do que a dessas microalgas alimentadas com ar, manteve-se o ritmo mais acelerado de crescimento das primeiras microalgas até o período entre o nono e o décimo dia.

Na Figura 4.3, observa-se a curva de absorvância da mistura de algas coletada no Passeio Público, em Curitiba. Verifica-se a ocorrência de uma fase estacionária, ou de menor crescimento relativo, seguida de um período de aceleração do crescimento até o início de uma fase de decréscimo da população de algas, causada pelo consumo dos nutrientes do meio de cultivo.

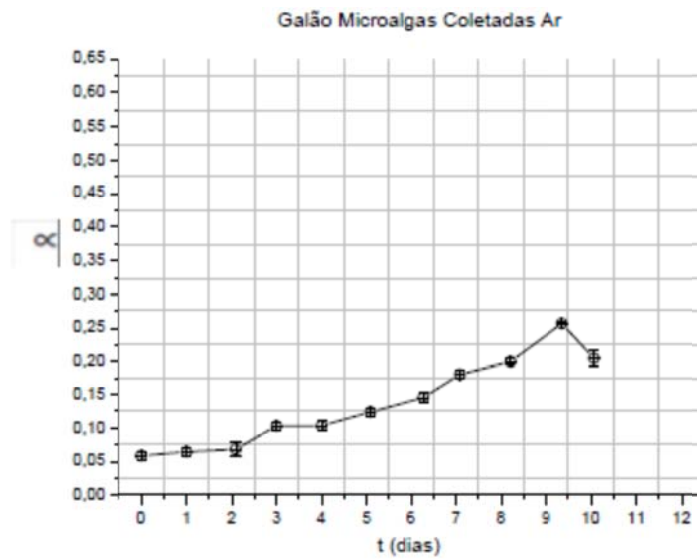


FIGURA 4.3 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA MISTURA DE ALGAS COM A ADIÇÃO DE AR EM GALÃO

Na Figura 4.4, ilustra-se a curva de absorvância da mistura de algas coletada com a adição das emissões do motor Diesel como fonte de carbono. Verifica-se, da mesma forma que no caso da microalga *Scenedesmus sp.*, um crescimento mais pronunciado quando se adicionam as emissões, porém sem o aumento do ciclo de vida até ser atingido o pico de produção de biomassa, ocorrendo uma redução deste.

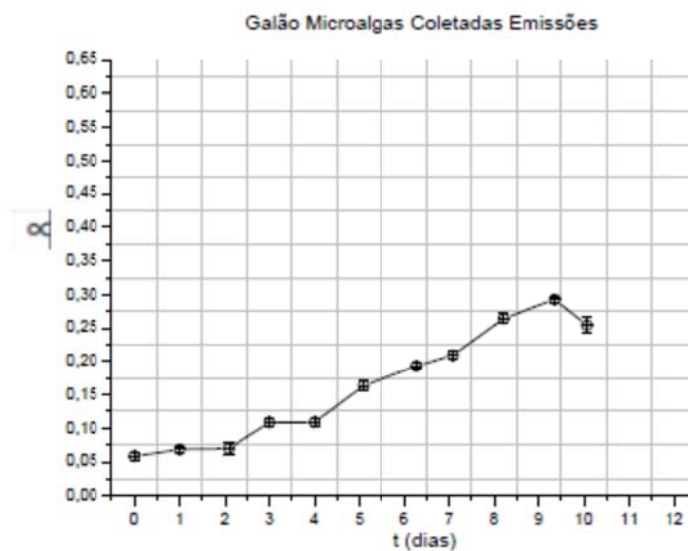


FIGURA 4.4 CURVA DE ABSORBÂNCIA DA MISTURA DE ALGAS COM A ADIÇÃO DE EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM GALÃO

Considerando as observações dos cultivos realizados em galões, fez-se a análise do cultivo da mistura de algas no mFBR com a adição de ar e com a adição dos gases de combustão do motor Diesel ao meio de cultivo. Na Figura 4.5, ilustra-se a curva de absorvância no mFBR. Observa-se uma oscilação maior no crescimento das microalgas quando comparado com o cultivo estacionário, são verificadas as fases comuns ao crescimento das algas. O crescimento estacionário ocorre até o segundo dia, quando acontece um aumento da taxa de crescimento seguido de novo período estacionário. O pico do crescimento ocorreu entre o sexto e o oitavo dia. Constata-se, ainda, um ciclo de vida no qual as algas atingem seu crescimento máximo no sétimo dia.

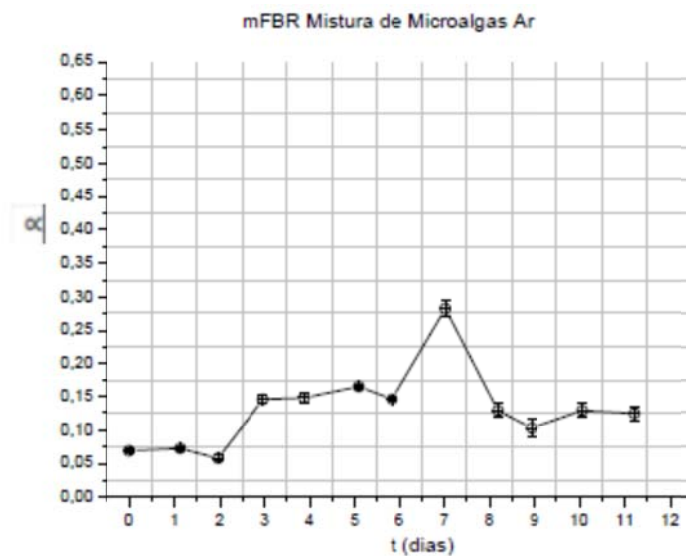


FIGURA 4.5 CURVA DE ABSORBÂNCIA DAS ALGAS COM A ADIÇÃO DE AR EM MFBR

Foi observado ainda que, ao comparar-se o cultivo das microalgas em galão e no mFBR, que as microalgas neste apresentaram um crescimento mais pronunciado e um ciclo de vida até atingir um pico de produção significativamente mais curto. As microalgas cultivadas em galão atingiram o pico de produção em aproximadamente 9,5 dias, enquanto no fotobiorreator esse período foi de cerca de 7 dias. Conclui-se, dessa forma, que o cultivo no mFBR foi mais eficiente do que aquele realizado em galão para as microalgas analisadas.

Na Figura 4.6, observa-se a curva de absorvância do cultivo da mistura de algas coletada com a adição das emissões do motor Diesel no minifotobiorreator. Verifica-se, inicialmente, um pequeno declínio no crescimento, conforme o esperado. Em seguida,

constata-se um aumento significativo da taxa de crescimento das microalgas a partir do segundo dia de cultivo. No quarto dia, mantém-se o aumento da taxa de crescimento, podendo-se considerar o quinto dia o período de maior taxa de crescimento das microalgas. A maior concentração inicial de microalgas e a maior taxa de crescimento têm como consequência a redução do ciclo de vida das microalgas, conforme o esperado – o que não ocorreu no caso dos cultivos em galão com a adição de emissões no lugar do ar.

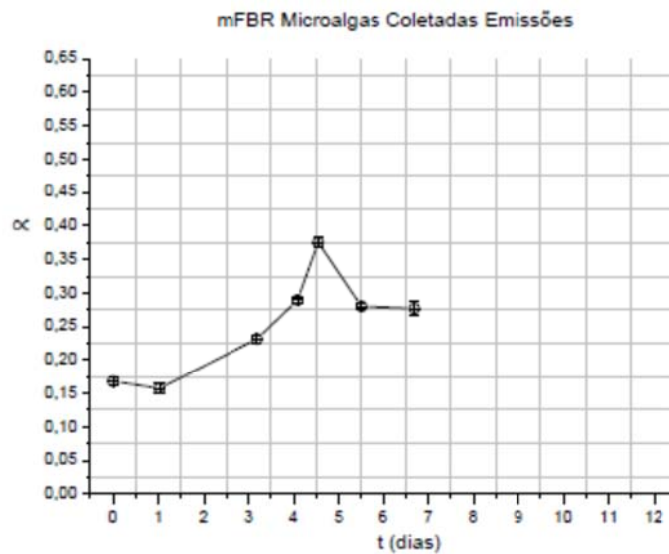


FIGURA 4.6 CURVA DE ABSORBÂNCIA DAS ALGAS COM A ADIÇÃO DE EMISSÕES DO MOTOR DIESEL EM MFBR

Analisando-se comparativamente o crescimento das microalgas cultivadas com emissões em galão e no mFBR, um crescimento notavelmente mais acelerado neste associado a um ciclo de vida até o atingimento do pico de produção significativamente maior. No cultivo das microalgas em galão, o ciclo de vida foi de 9 dias, enquanto no fotobiorreator foi de 4,5 dias, o que representa um resultado bastante satisfatório.

Na Tabela 4.1, são expostos os valores coletados de absorvância, para todos os cultivos analisados:

TABELA 4.1

	α_i	α_f	$\Delta\alpha$	Ciclo (dias)
Galão <i>Scenedesmus</i> sp. (ar)	0,217	0,5	0,283	8,2
Galão <i>Scenedesmus</i> sp. (emissões)	0,209	0,621	0,412	9,3
Galão Coleta (ar)	0,0583	0,256	0,197	9,35
Galão Coleta (emissões)	0,0583	0,264	0,206	8,2
mFBR (ar)	0,0697	0,281	0,212	7,02
mFBR (emissões)	0,168	0,375	0,207	4,08

4.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA DO SISTEMA MULTIGERADOR

O sistema multigerador desenvolvido consiste do fornecimento de eletricidade, calor e emissões com a produção de biomassa de microalgas com a finalidade de extrair biodiesel. Realizou-se um estudo comparativo do rendimento termodinâmico do sistema tendo como referência sua operação apenas com o suprimento de energia elétrica, atendendo as demandas do edifício NPDEAS. Desse modo, a partir da energia proveniente da combustão do Diesel e da produção de eletricidade, calor e biomassa, avaliaram-se os resultados obtidos.

Com essa finalidade, realizaram-se testes com a demanda energética de $20 \pm 0,5$ kW, que é a demanda média do edifício NPDEAS. O calor recuperado do grupo motorizador, quando alcançada a estabilidade térmica, após 40 minutos de operação do sistema, foi de $7,91 \pm 0,24$ kW. A Figura 4.19 ilustra um gráfico do calor recuperado pelo trocador de calor durante o período de testes.

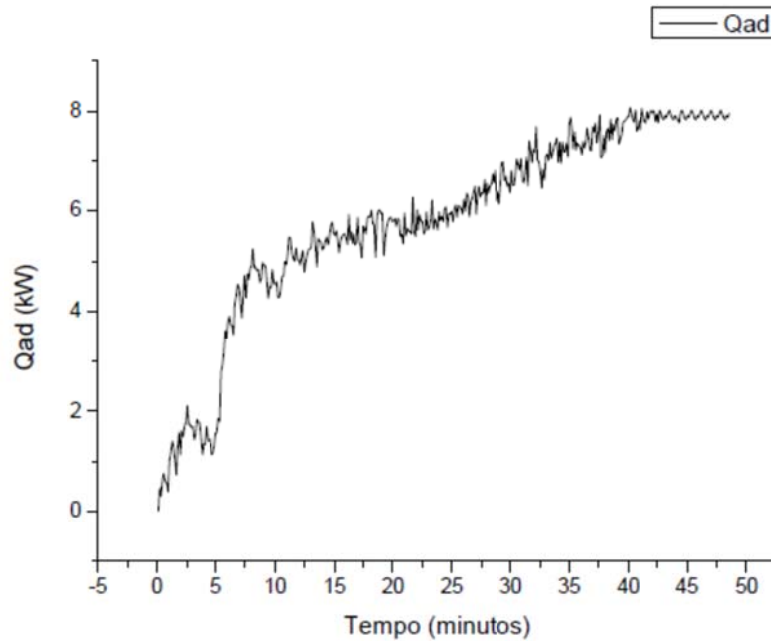


FIGURA 4.7 CALOR RECUPERADO PELO TROCADOR DE CALOR

A Figura 4.8 ilustra o rendimento termodinâmico do sistema operando com a recuperação de calor. Com o sistema produzindo apenas eletricidade, rendimento termodinâmico foi de 26%. Em relação essa configuração, houve um acréscimo de 39,55% no rendimento termodinâmico, com uma eficiência de 36,2%.

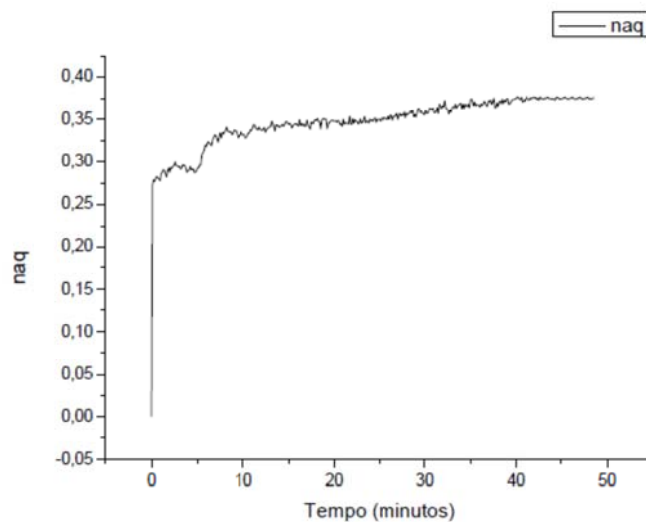


FIGURA 4.8 RENDIMENTO DO SISTEMA COM A RECUPERAÇÃO DE CALOR

Ao suprir com os gases de combustão o fotobiorreator compacto, adiciona-se um novo componente energético ao sistema, relacionado com a capacidade de extrair biodiesel da biomassa de microalgas produzida. A captação das emissões do motor Diesel foi realizada por intermédio de um compressor com reservatório de 350 litros. Esse reservatório foi preenchido à pressão de 8 bar em um período de 10 minutos, à temperatura ambiente, correspondendo ao suprimento de emissões por um período de 24 horas. Desse modo, conforme a equação dos gases ideais:

$$p.V = m_{em}.R.T \quad (14)$$

$$m_{em} = 5 \text{ kg}$$

Desse modo:

$$\dot{m}_{em} = 5,787.10^{-5} \text{ kg/s}$$

Essa vazão de emissões no minifotobiorreator teve como resultado a produção de 41,4 gramas de biomassa seca em um volume de 60 litros em um período de 5 dias. Assumindo produção contínua no momento de pico da produtividade de algas, entre o quarto e o quinto dia, tem-se um produção diária de 8,28 gramas por dia. Dessa quantidade de biomassa, o NPDEAS consegue extrair 30% de lipídios, enquanto Chisti (2007) relata proporções de até 80%. Esse montante equivale à seguinte adição de energia ao sistema:

$$\dot{Q}_{biodiesel} = 0,30. \dot{m}_{biomassa}. PCI_{biodiesel} \text{ (NPDEAS)} \quad (15)$$

Desse modo, considerando $PCI_{biodiesel} = 42500 \text{ kJ/kg}$

$$\dot{Q}_{biodiesel} = 0.00122 \text{ kW} - \text{conforme a situação atual do NPDEAS}$$

Essa energia adicional seria muito pouco significativa no sistema. Extrapolando a situação para o suprimento de todas as emissões do motor Diesel em tempo integral para o sistema, como 10 minutos de emissões suprem o fotobiorreator compacto por 24 horas, com o sistema multigerador operando em período integral, tem-se o seguinte fator de multiplicação:

$$FM = \frac{24h \times 60 \text{ min}}{10 \text{ min}} = 144$$

Multiplicando-se esse fator pelo volume do fotobiorreator compacto:

$$FM.V_{mFBR} = 8.640 \text{ litros}$$

Esse valor equivale, aproximadamente, ao volume de um fotobiorreator em escala real. Nessa situação, obter-se-ia uma produção de biomassa de 1192,32 gramas por dia, o que equivaleria, em termos de energia, à geração contínua de 0,176 kW. Esse sistema, quando comparado ao grupo gerador operando isoladamente, teria um acréscimo de eficiência de 40%.

Essa extrapolação não considera a possibilidade de se aumentar a densidade de microalgas no fotobiorreator e tampouco problemas como a maior frequência da passagem das microalgas pelo rotor da bomba no fotobiorreator compacto, o que certamente prejudica a produção de biomassa. Observou-se a necessidade de operar o fotobiorreator em escala real com uma concentração de biomassa significativamente maior, a fim de obter-se uma produção diária aproximadamente 14 vezes maior do que a extrapolada no presente trabalho e aprimorar-se a capacidade de produção de lipídios das algas, de modo a suprir as demandas energéticas do edifício NPDEAS mediante a operação de 20 fotobiorreatores. Considerando-se que se espera uma produtividade obtida por Converti *et al.* (2006) foi entre 6 e 7 vezes maior do que a de em tanques, percebe-se que há espaço para significativas melhorias no minifotobiorreator.

Essa avaliação é relativizada pelo fato do fotobiorreator compacto apresentar uma configuração semelhante ao fotobiorreator em escala real, mas que potencializa alguns de seus problemas. As microalgas, no minifotobiorreator, são submetidas a tensões hidrodinâmicas significativamente maiores do que no caso do fotobiorreator em escala real, pois a recirculação das algas na bomba de água ocorre com muito maior frequência. Ainda, a transferência de calor da bomba para o meio de cultivo, no fotobiorreator compacto, é significativa. No fotobiorreator em escala real, devido ao volume e comprimento deste ser 144 vezes maior quando comparado ao fotobiorreator compacto, o

efeitos da transferência de calor pela bomba e das tensões hidrodinâmicas são significativamente reduzidos.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo, foi desenvolvido um sistema multigerador com a finalidade de produzir eletricidade, calor e biomassa a partir das emissões provenientes de um motor capaz de operar com biodiesel e Diesel. O sistema é constituído essencialmente de um motor Diesel acoplado a um gerador elétrico, de um trocador de calor e do fotobiorreator compacto. Ao produzir-se eletricidade no grupo moto-gerador, o calor que seria rejeitado na forma de emissões ao meio ambiente é recuperado no trocador de calor para, posteriormente, ocorrer o aproveitamento dos gases de combustão para produzir biomassa de microalgas.

Foram avaliados os efeitos dos gases de combustão do Diesel sobre as microalgas estudadas, mediante o estudo e a comparação de cultivos com o fornecimento de ar e de gases de combustão. Com essa finalidade, foram medidos e analisados os efeitos das emissões nos meios de cultivo. Nos experimentos realizados em galões, analisou-se o efeito dos gases de combustão em uma mistura de algas coletada no Passeio Público e na microalga *Scenedesmus sp.* No fotobiorreator compacto, foram realizados experimentos apenas com a mistura de microalgas. Desse modo, concluiu-se que:

- (i) Foi demonstrado que o mFBR foi mais eficiente no cultivo de microalgas, com uma produção maior em um ciclo de vida 51,3% e 25% menor quando se compara, respectivamente, os cultivos com adição de emissões e de ar;
- (ii) As emissões do motor Diesel tiveram um efeito positivo sobre as microalgas em todos os experimentos no que concerne a produção de biomassa;
- (iii) Constatou-se um crescimento mais acelerado e eficaz quando da adição das emissões, tendo ocorrido uma redução do ciclo de vida em todos os casos, exceto no experimento com a alga *Scenedesmus sp.*, no qual observou-se um aumento de 13,4% no ciclo de vida, porém houve um aumento na produção de microalgas;

Uma análise termodinâmica do sistema multigerador foi realizada. Foram realizados experimentos para uma demanda de energia elétrica de 20 kW e um suprimento de 7,91 kW de água aquecida, com o fornecimento dos gases de emissão do grupo multigerador para o cultivo de microalgas com a finalidade de produzir

biomassa, da qual se pretende extrair biodiesel, acrescentando novo componente energético ao sistema. Na análise termodinâmica, constatou-se que:

- (i) O sistema apresentou aumento da eficiência de 39,55% quando comparado com o sistema gerando apenas eletricidade, sendo que o aumento do rendimento decorre principalmente da recuperação de calor pela água;
- (ii) A biomassa produzida no fotobiorreator compacto foi insuficiente para produzir efeitos significativos sobre a eficiência termodinâmica do sistema;
- (iii) Ao extrapolar-se os resultados para a dimensão de um fotobiorreator em escala real, constatou-se um rendimento 40% maior quando comparado ao grupo gerador elétrico operando isoladamente;
- (iv) Considerando a extrapolação realizada, observou-se que, para suprir o edifício NPDEAS, há a necessidade de uma produtividade cerca de 10 vezes maior do que a observada. Apesar desse fato, ocorre que a extrapolação subestima a capacidade de produção do FBR, uma vez que o mFBR potencializa efeitos adversos ao crescimento microalgal existentes naquele. Deve-se considerar, ainda, que há amplo espaço para aumento da produtividade do FBR, considerando-se que é possível aumentar a concentração de lipídios nas microalgas e que o equipamento ainda está em fase de desenvolvimento.

O presente trabalho agregou a geração de biomassa para a produção de biocombustíveis a sistemas multigeradores, algo não observado na bibliográfica. Analisasse, de maneira combinada, o rendimento termodinâmico e a produção de biomassa com a finalidade de se produzir biodiesel em um sistema que apresente a potencialidade de ter seus gases de combustão gerados aproveitados. Trata-se de um sistema que não emite gases estufa e que agrega um valor às emissões produzidas, ao verificar-se que os gases de combustão têm um efeito positivo sobre o crescimento de microalgas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Constatou-se a possibilidade de desenvolvimento de alguns estudos relacionados ao presente trabalho:

- (i) Acoplamento do sistema multigerador a um refrigerador por absorção, em configuração *split*, com o calor dos gases de combustão sendo enviado alternativamente ao refrigerador e ao trocador de calor;
- (ii) Avaliação dos efeitos das emissões em um fotobiorreator em escala real;
- (iii) Estudos sobre a influência dos nutrientes sobre as microalgas associado à análise da composição dos gases de combustão;
- (iv) Análise a respeito da possibilidade de controle de pH do meio de cultivo mediante a adição de nutrientes e de emissões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABALDE, J. *et al.*, **Microalgas: cultivo e aplicaciones**. Monografias, n. 26, Universidadeda Coruña: España, 1995.

AI, W.; Guo, S.; Qin, L.; Tang B. Y., **Development of a ground-based space micro-algae photo-bioreactor**, *Advances in Space Research*, 2008,41:42–747.

AKIYAMA, T.; Matsumoto, H.; Asakura, K.; **Dynamic simulation and its applications to optimum operation support for advanced combined cycle plants**, *Energy Conversion and Management*, 1997, vol. 38 (15-17), p. 1709-1723.

AL-SULAIMAN, F. A.; Hamdullahpur, F.; Dincer, Ibrahim, **Trigeneration: A comprehensive review based on prime movers**, *International Journal of Energy Research*, 2010, vol. 35, p. 233–258.

ALANNE, K.; Saari, A.; **Sustainable small-scale CHP Technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2004, vol. 8 (5), p. 401-431.

BALLI, O.; Aras, H.; Hepbasli, A.; **Thermodynamic and thermoeconomic analyses of trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part I – Methodology**, *Energy Conversion and Management*, 2010a, vol. 51, p. 2252-2259.

BALLI, O.; ARAS, H.; HEPBASLI, A.; **Thermodynamic and thermoeconomic analyses of trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part II**, *Energy Conversion and Management*, 2010b, vol. 51, p. 2252-2259.

BASSOLS, J.;Buchkelkorn, B.;Langreck, J.; Schneider, R.;Veelken, H.;**Trigeneration in the food industry**, *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22 (6), p. 595-602.

BECKER, E. W.; **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phyiology**. London: Blackwell Science, 2004, p. 312-351.

BERNDSSEN, J. C.; Vargas, J. V. C.; Dilay, E.; Dias, F. G.; Ordonez, J. C.; Parise, J. A. R.; Campos, M. C.; Maciel, V. D.; Oçoski, L. R. C. G; **Experimental Development of a trigenerador system for simultaneous production of Heat, Electricity, and Cold**, Curitiba, 2006, CIT06-0786

BOURGEOIS, T. G.; Hedman, B.; Zalczman, F.; **Creating markets for combined heat and power and clean distributed generation in New York State**, Environmental Pollution, 2003, vol. 123 (3), p. 451-462.

BRONW, M. R.; JEFFREY, S. W.; VOLKMAN, J. K.; DUNSTAN, G. A., **Nutritional properties of microalgae for mariculture**. Aquaculture, 1997, vol. 151, p. 315-331.

BURER, M.; Tanaka, K.; Favrat, D.; Yamada K.; **Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solide oxide fuel-cell gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers**, Energy, 2003, vol. 28 (6), p. 497-518.

CARDONA, E.; Piacentino, A.; **A methodology for sizing a trigeneration plant in Mediterranean áreas**, Applied Thermal Engineering, 2003, vol. 23, p. 1665–1680.

CARDONA, E.; Piacentino, A.; **A measurement methodology for monitoring a CHCP pilot plant for an office building**, Energy and Buildings, 2003, vol. 35 (9), p. 919-925.

CARDONA, E.; Piacentino, A.; **Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics**, Applied Energy, 2007, vol. 84 (7–8), p. 729–748.

CARDONA, E.; Piacentino, A.; **A new approach to exergoeconomic analysis and design of variable demand energy systems**, Energy, 2006, vol. 31(4), p.490–515.

CARDONA, E.; Piacentino, A.; Cardona F.; **Matching economical, energetic and environmental benefits: an analysis for hybrid chcp-heat pump systems**, Energy Conversion and Management, 2006, vol. 47 (20), p. 3530–3542.

CHICCO, G.; Mancarella, P.; **From cogeneration to trigeneration: profitable alternatives in a competitive market**, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, vol. 21(1), p. 265–272.

CHICCO, G.; Mancarella, P.; **Planning aspects and performance indicators for small-scale trigeneration plants**, International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands, 2005.

CHICCO, G.; Mancarella, P.; **Planning evaluation and economic assessment of the electricity production from small-scale trigeneration plants**, WSEAS Transactions on Power Systems, 2006. Vol. 1(2), p. 393–400.

CHICCO, G.; Mancarella, P.; **Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development**, Energy Policy, 2007, vol. 35(12), p. 6132–6144.

CHICCO, G.; Mancarella, P.; **A unified model for energy and environmental performance assessment of natural gas-fueled poly-generation systems**, Energy Conversion and Management, 2008, vol. 49 (8), p. 2069–2077.

CHICCO, G.; Pierluigi, M.; **Matrix modeling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization**, Elsevier, Energy, 2009, vol. 34, p. 261–273.

CHISTI, Y.; **Biodiesel from microalgae**. Biotechnology advances, 2007, vol.25, p. 294–306.

CHO, H.; Eksioğlu, S. D.; Luck, R.; Chamra, L. M.; **Operation of a CCHP system using an optimal energy dispatch algorithm**, ASME, 2008.

CHO, H.; Eksioğlu, S. D.; Luck, R.; Chamra, L. M.; **Evaluation of CCHP systems**

COLPIER, U. C.; Cornland, D.; **The economic of the combined cycle gas turbine an experience curve analysis**, Energy Policy, 2002, vol. 30, p. 309-316.

COMPERNOLLE, T.; Witter, N.; Van Passel, S.; Thewys, T.; **Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO₂-emissions**, Energy, 2011, vol. 36, p. 1940-1947.

CONVERTI, A.; Lodi, A.; Del Borghi, A.; Solisio, C., **Cultivation of *spirulinaplantensis* in a combined airlift-tubular reactor system**, Biochemical Engineering Journal, 2006, vol. 1, p. 13-18.

D' ACCADIA, M. D.; **Optimal operation of complex thermal system: a case study**, International Journal of Refrigeration, 2001, vol. 24 (4), p. 290-301.

DENG, J.; Wang, R.; Wu, J.; Han, G.; Wu, D.; Li, S.; **Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics**, Energy, 2008, vol. 33(9), p. 1417-1426.

EAMES, I. W.; Wu, S.; **Efficient use of waste heat from combined heating and power machines for building cooling**. Proc. SITHOK-3 Int. Congr., Maribor, SI., 1998, p. 127-134.

FANTOZZI, F.; Ferico, S. D.; Desideri, U.; **Study of a cogeneration plant for agrofood industry**, Applied Thermal Engineering, 2000, vol. 20 (11), p. 993-1017.

FRANCO, A.; Casarosa, C.; **On some perspectives for increasing the efficiency of combined cycle power plants**, Applied Thermal Engineering, 2002, vol. 22, p. 1501-1518.

GODEFROY, J.; Boukhanouf, R.; Riffat, S.; **Design, testing and mathematical modelling of a smallscale CHP and cooling system (small CHP-ejector trigeneration)**, Applied Thermal Engineering, 2007, vol. 27 (1), p. 68–77.

GROHNHEIT, P. E.; Mortensen, B. O. G.; **Competition in the Market for space heating: District heating as the infrastructure for competition among fuels and technologies**, Energy Policy, 2003, vol. 31 (9), p. 817-826.

GUNES, M. B.; Ellis, M. W.; **Evaluation of energy, environmental and economic characteristics of fuel cell combined heat and power systems for residential applications**, Journal of Energy Resources Technology – Transactions of the ASME, 2003, vol. 125 (3), p. 208-220.

GUNZBOURG, J.; Larger, D.; **Cogeneration applied to very high efficiency thermal seawater desalination plants**, Desalination, 1999, vol. 125 (1-3), p. 203-208.

HÄDER, D.P.; Porst, M.; Lebert, M., **Photosynthetic performance of the Atlantic Brown macroalgae, *Cystoseira abies-marina*, *Dictyota dichotoma* and *Sargassum vulgare*, measured in Gran Canaria on site**. Environmental and Experimental Botany, 2001, vol. 45, p. 21–32.

HERNÁNDEZ-SANTOYO, J.; Sánchez-Cifuentes, A.; **Trigeneration: an alternative for energy savings**, Applied Energy, 2003, vol. 76 (1-3), p. 219-227.

HÉTEU, P. M. T.; Bolle, L.; **Economied'énergieemtrigénération**, International Journal of Thermal Sciences, 2002, vol. 41, p. 1151-159.

HUANGFU, Y.; Wu, J. Y.; Wang, R. Z.; Xia, Z. Z.;**Experimental investigation of adsorption chiller for micro-scale BHCP system application**, Energy and Buildings, 2007, vol. 39(2), p. 120–127.

HUANGFU, Y.; Wu, J.Y.; Wang, R. Z.; Kong, X. Q.; Wei B. H.;**Evaluation and analysis of novel micro-scale combined cooling, heating and power (MCCHP) system**, Energy Conversion and Management, 2007, vol. 48(5), p.1703–1709.

UGWU, C. U.; Aoyagi, H.; Uchiyama, H., **Photobioreactors for mass cultivation of algae**,Bioresource Technology, 2008, vol. 99, p. 4021–4028.

JABER, D.; Vetterrick, R., **Reliable systems and combined heat and power**, Steam Digest 2001, 2001, US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program.

KUNJAPUR, A. M.; Eldridge R. B., **Photobioreactor Design for Commercial Biofuel Production from Microalgae**.Ind. Eng. Chem. Res. 2010, vol. 49, p. 3516–3526.

LEHR, F.; Posten, C.; **Closed photo-bioreactors as tools for biofuel production**. Current Opinion in Biotechnology, 2009, vol. 20, p. 280-285.

LIN, F.; Yi, J., Weixing, Y.; Xuzhong, Q.; **Influence of supply and return water temperature on the energy consumption of a district cooling system**, Applied Thermal Engineering, 2001, vol. 21 (4), p. 511-521.

LIN, L.; Wang, Y.; Al-Shemmeri; T., Ruxton, T.; Turner, S.; Zeng, S.; Huang, J.; He, Y.; Huang, X.; **An experimental investigation of a household size trigeneration**, *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27 (2–3), p. 576–585.

MAIDMENT, G. G.; Tozer, R. M., **Combined cooling heat and power in supermarkets**, *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22(6), p. 653–665.

MAJEWSKY, W. A.; Khair, M. K., **Diesel Emissions and their control**, SAE International, 2006.

MALDAGUE, P. E.; **Combined heat and power (CHP) vs. separate heat and power (SHP) generation for primary energy conservation**, *Journal of Heat Recovery Systems*, 1984, vol. 4 (5), p. 337-340.

MARIANO, A.B.; Torrens, J.; Satyanarayana, K.G.; Vargas, J.V.C., **Energia auto-sustentável a partir de biodiesel derivado de microalgas**. IV Congresso Internacional de Bioenergia, 2009.

MÍGUEZ, J. L.; Murillo, S.; Porteiro J.; López, L. M.; **Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: design and development I**, *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24, p. 1409-1419.

MINCIUC, E; Corre, O. L Athanasovici, V., Tazerout, M. e Bitir, I., **Thermodynamic analysis of tri-generation with absorption chilling machine**, *Applied Thermal Engineering*, 2003, vol. 23 (11), p. 1391-1405.

MOLINA GRIMA, E.; Fernández, A.F.G.; Camacho, F.G.; Chisti, Y., **Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup**. *Journal of Biotechnology*, 1999, vol. 70, p. 231–247.

MOLINA, E.; Fernández, J.; Acién, F.G.; Chisti, Y., **Tubular photobioreactor design for algalcultures**. *Journal of Biotechnology*, 2001, vol. 92, p. 113–131

OBERT, E. F., **Motores de combustão interna**, Porto Alegre: Globo, 1971.

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, C. B.; CORRÊA, D. O., MIYAWAKI; TAHER, D. M.; FREGONESI; SANTOS, K. R.; VARGAS, J. V. C; MARIANO, A. B.; **Avaliação da produtividade de biomassa da microalgasscenedesmus sp.em diferentes meios de cultivo com foco em biodiesel, 2010**

OLIVEIRA, A. C., Afonso, C. e Matos, J., **A combined heat and power system for buildings driven by solar energy and gas**, *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22 (6), p. 587-593.

PARISE, J. A. R., Vargas, J. V. C, e Marques, R. P., **Fuel Cells and Cogeneration**, Third International Conference on Fuel Cell Science Engineering and Technology, Ypsilanti, MI, USA, 2005.

PORTEIRO, J., Míguez, J. L., Murillo, S., Porteiro J. e López, L. M., **Feasibility of a new domestic CHP trigeneration with heat pump: design and development II (Availability analysis)**, *Applied Thermal Engineering*, 2004, vol. 24 (10), p. 1421-1429.

PRUZAESKY, F. C.; **Análise de um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade, Frio e Calor**, Tese de Doutorado, 2005, PUC-RJ.

PULZ, O. e Scheibenbogen, K., **Photobioreactors: Design and Performance with respect to Light Energy Input**. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 1998, vol. 59, p. 287-293.

ROLFSMAN, B., **Combined heat and power plants and district heating in a deregulated electricity Market**, Applied Energy, 2004, vol. 78 (1), p. 37-52.

SATYANARAYANA, K. G.; Mariano, A. B.; Vargas, J. V. C.; **A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials**, Energy Research, 2010, vol. 35.

LOURENÇO, S. O.; **Cultivo de microalgasmarinhas – princípios e aplicações**, RIMA EDITORA, 2006.

SCHENK, P.M.; Thomas-Hall, S.R.; Stephens, E.; Marx, U.C.; Mussnug, J.H.; Posten, C.; Kruse, O.; Hankamer, B., **Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production**, BioEnergy Research, 2008, vol. 1, Number 1, p. 20-43

SUH, I. S.; Lee, C.G..**Photobioreactor engineering: Design and performance**. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2003, vol. 8, n. 6, p. 313-321.

SZKLO, A. S., Soares, J. B. e Tolmasquim, M. T., **Energy consumption indicators and CHP technical potential in the Brazilian hospital sector**, Energy Conversion and Management, 2004, vol 45 (13-14), p. 2075-2091.

TEMIR, G.; Bilge, D.;**Thermoeconomic analysis of a trigenerations system**, Applied Thermal Engineering, 2004, vol. 24 (17-18), p. 2689-2699.

TREDICI, M.R., **PhotoBioreactors, photo**. Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation, 1999, vol. 1, p. 395–419.

TREDICI, M. R., **Mass production of microalgae: photobioreactors**. Oxford: Blackwell Science, 2004, p. 178-214.

VANDANJON, L.; Rossingnol, N.; Jaouen, P.; Robert, J.M.; Quemeneur, F., **Effects of shear on two microalgae species. Contribution of pumps and valves in tangential flow filtration systems**. Biotechnology and Bioengineering 1998, vol. 63(1), p. 1-9.

VEDAMURTHY, V. N. e Sarathy, C. P., **A Techno-economic model for determining the critical energy ratio of co-generation in process industries**, Mathematical and Computer Modelling, 1990, vol. 14, p. 1117-1122.