

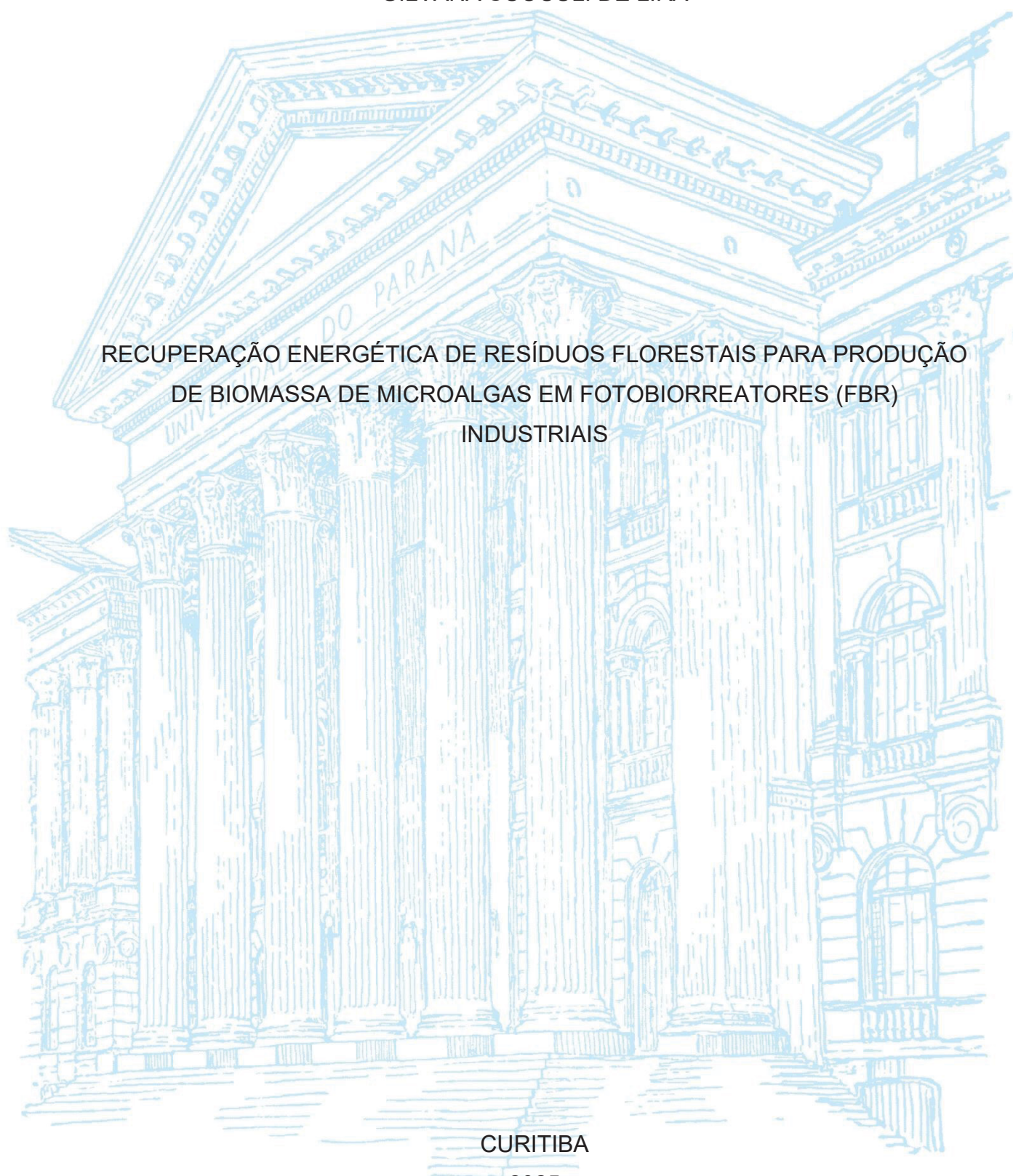
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GILVANA SCOCULI DE LIRA

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS FLORESTAIS PARA PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES (FBR)
INDUSTRIAIS

CURITIBA

2025



GILVANA SCOCULIDE LIRA

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS FLORESTAIS PARA PRODUÇÃO
DE BIOMASSA DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES (FBR)
INDUSTRIAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Profº. Dr. André Bellin Mariano

Coorientadores: Dr. Dhyogo Miléo Taher
Dr. Marcelo Langer

CURITIBA
2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Lira, Gilvana Scoculi de

Recuperação energética de resíduos florestais para produção de biomassa de microalgas em fotobiorreatores industriais / Gilvana Scoculi de Lira. – Curitiba, 2025.
1 recurso on-line : PDF.

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

Orientador: André Bellin Mariano Coorientador:
Dhyogo Miléo Taher

1. Biomassa. 2. Microalgas. 3. Resíduos vegetais. 4. Sistemas energéticos e sustentabilidade. 5. Fotobiorreatores industriais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. III. Mariano, André Bellin. IV. Taher, Dhyogo Miléo. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
CIÊNCIA DOS MATERIAIS - 40001016033P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GILVANA SCOCULI DE LIRA**, intitulada: **Recuperação Energética de Resíduos Florestais para Produção de Biomassa de Microalgas em Fotobiorreatores Industriais**, sob orientação do Prof. Dr. ANDRE BELLIN MARIANO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 10 de Abril de 2025.

Assinatura Eletrônica
14/04/2025 09:15:30.0
ANDRE BELLIN MARIANO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
14/04/2025 10:11:30.0
LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica
15/04/2025 12:22:21.0
PEDRO AUGUSTO ARROYO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ)

Assinatura Eletrônica
14/04/2025 08:58:35.0
RILTON ALVES DE FREITAS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
14/04/2025 13:56:40.0
JOSE VIRIATO COELHO VARGAS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
16/04/2025 12:39:23.0
DHYOGO MILÉO TAHER
Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
16/04/2025 16:15:48.0
MARCELO LANGER
Coorientador(a) (40001016)

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por ter me dado coragem e sabedoria para superar os desafios ao longo dessa jornada. Sem Sua graça e amparo, essa conquista não seria possível.

Aos meus pais e minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos. Por sempre acreditaram em mim e me ensinarem o valor da dedicação e da perseverança.

Aos amigos, que compartilharam comigo essa caminhada, seja nos momentos de descontração ou nos desafios enfrentados. A amizade e o suporte de cada um de vocês foram fundamentais para seguir em frente.

Aos meus orientadores, pelo direcionamento e ensinamentos ao longo desta trajetória, para a construção deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao grupo de pesquisa, pelo apoio técnico, troca de conhecimentos e o espírito colaborativo dentro do grupo foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores externos à universidade, aos laboratórios e seus respectivos técnicos que contribuíram com sugestões, críticas e incentivo, ampliando minha visão científica e contribuindo significativamente para o desenvolvimento da pesquisa. Também disponibilizaram equipamentos e suporte para a realização dos experimentos necessários para esta tese. Sem essa infraestrutura e dedicação, este trabalho não teria sido viável.

Aos alunos da graduação e da pós-graduação que, de alguma forma, contribuíram para a execução deste estudo. Cada um teve um papel importante nesta trajetória. A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigada!

Mateus 8:27

Provérbios 16:3

RESUMO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais contemporâneos, impulsionadas pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes principalmente da queima de combustíveis fósseis. Para mitigar esses efeitos, é essencial a utilização de fontes alternativas de energia que sejam sustentáveis e de baixo carbono. A utilização de biomassa florestal como combustível sólido surge como uma alternativa para contribuir na redução de emissões de GEE e promover o aproveitamento energético sustentável. A Universidade Federal do Paraná (UFPR) gera resíduos florestais provenientes da poda e manutenção arbórea dos *campi*, comparáveis a centros urbanos. Atualmente, quando o volume é considerado alto, os resíduos são triturados para incorporação natural ao solo ou direcionados para a Fazenda Canguiri, em Pinhais-PR. Com a finalidade de maximizar o espaço físico e agregar valor aos resíduos florestais, este trabalho propõe uma destinação alternativa de incineração e reaproveitamento desses resíduos florestais em um sistema patenteado que integra a produção simultânea de microalgas e tratamentos de emissões gasosas. Inicialmente, um estudo detalhado sobre a gestão dos resíduos florestais foi realizado por meio de questionários e coletas sistemáticas. Os resíduos foram coletados em três etapas: amostras individuais de troncos (15 amostras); compartimentos isolados (galhos; folhas; galhos com folhas); e três *blends* compostos por misturas desses compartimentos. Todas as amostras foram submetidas a análises físico-químicas completas, incluindo análise química imediata, determinação de umidade, análise elementar, poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI), e microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV-EDS). Os resultados demonstraram uma alta heterogeneidade dos resíduos, impossibilitando a separação por espécies vegetais específicas ou compartimentos definidos. Contudo, os valores obtidos de PCS e PCI revelaram alto potencial energético, sendo as melhores performances verificadas nas amostras de troncos (PCS 23,68 MJ kg⁻¹; PCI 22,44 MJ kg⁻¹) e *blends* com desempenho energético igualmente significativo. A biomassa microalgal produzida nos fotobiorreatores (FBR's), utilizando os gases de combustão como fonte de carbono, foi também caracterizada utilizando as mesmas técnicas físico-químicas,

complementadas por avaliação antioxidante pelo método DPPH, determinação proteica pelo método Kjeldahl e por análise elementar. Não houve detecção de atividade antioxidante significativa nas condições avaliadas. No entanto, os valores médios do teor proteico determinados pelos métodos de Kjeldahl e de análise elementar (Dumas) foram de 40,0 % e 36,7 %, respectivamente. As análises de MEV-EDS e elementar confirmaram a predominância dos mesmos elementos majoritários nas biomassas vegetal e microalgal, indicando uma eficiente transferência de elementos e confirmando a viabilidade técnica do processo integrado. Todos os materiais analisados nesta pesquisa apresentaram resultados compatíveis ou superiores aos relatados na literatura como combustíveis sólidos renováveis, ressaltando o potencial dos resíduos florestais e da biomassa microalgal como alternativas viáveis à utilização de combustíveis fósseis. Destaca-se que a abordagem em escala de engenharia aplicada nesta tese configura uma contribuição científica inédita, alinhada às estratégias globais de sustentabilidade energética e ambiental, promovendo simultaneamente a valorização energética de resíduos e a redução das emissões de GEE.

Palavras-chave: valorização energética de resíduos; biomassa microalgal; incineração integrada; fotobiorreatores industriais; sustentabilidade energética.

ABSTRACT

Climate change represents one of the greatest contemporary global challenges, driven mainly by greenhouse gas (GHG) emissions resulting from the combustion of fossil fuels. To mitigate these effects, it is essential to adopt alternative energy sources that are both sustainable and low-carbon. The use of forest biomass as a solid fuel emerges as a viable alternative to contribute to GHG emissions reduction and to promote sustainable energy recovery. Federal University of Paraná (UFPR) generates forest residues from pruning and tree maintenance across its campuses, comparable to the practices seen in urban centres. Currently, when the volume is considered significant, these residues are either shredded for natural incorporation into the soil or transported to Canguiri Farm in Pinhais- PR. In order to optimise physical space and add value to this forest residues, this study proposes an alternative disposal route involving incineration and reuse of within a patented system that integrates simultaneous production of microalgae with the treatment of gaseous emission. Initially, a detailed study of forest waste management was carried out through questionnaires and systematic samplings. The residues were collected in three stages: individual trunk samples (15 samples); isolated compartments (branches; leaves; branches with leaves); and three blends comprising mixtures of these compartments. All samples underwent comprehensive physicochemical analyses, including proximate analysis, moisture content determination, ultimate analysis, higher heating value (HHV), lower heating value (LHV), and scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The results demonstrated high heterogeneity among residues, preventing separation by specific plant species or defined compartments. Nevertheless, the HHV and LHV results revealed high energy potential, with the best performance observed in trunk samples (maximum HHV of 23.68 MJ kg⁻¹; LHV of 22.44 MJ kg⁻¹) and in blends which also exhibited significant energy performance. The microalgal biomass produced in photobioreactors (PBRs), using combustion gases as a carbon source, was also characterised using the same physicochemical techniques, complemented by antioxidant evaluation via the DPPH method and protein quantification using the Kjeldahl method, and ultimate analysis. No significant antioxidant activity was detected under the evaluated conditions. However, the mean protein content

determined by the Kjeldahl and elemental analysis (Dumas) methods were 40.0 % and 36.7 %, respectively. Highlighting the biomass's relevance for industrial and biotechnological applications. SEM-EDS and ultimate analyses confirmed the predominance of similar major elements in both vegetal and microalgal biomasses, indicating efficient elemental transfer and confirming the technical feasibility of the integrated process. All materials analysed in this research presented results comparable or superior to those reported in the literature for renewable solid fuels, highlighting the potential of forest residues and microalgal biomass as viable alternatives to fossil fuels. It is worth noting that the engineering-scale approach adopted in this thesis represents a novel scientific contribution, aligning with global strategies for energy and environmental sustainability, by simultaneously promoting energy recovery from waste and reduction of GHG emissions.

Keywords: energy valorisation of waste; microalgal biomass; integrated incineration; industrial photobioreactors; energy sustainability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMAS ABERTOS DE CULTIVO DE MICROALGAS	40
FIGURA 2 – SISTEMA FECHADO DE CULTIVO DE MICROALGAS	41
FIGURA 3 – VISTA AÉREA DO NPDEAS, CURITIBA, BRASIL.....	42
FIGURA 5 – CARRO ELÉTRICO ZOOMCAR PARA COLETA DE RESÍDUOS	48
FIGURA 6 – VISÃO GERAL DO LOCAL DE DEPÓSITO DOS RESÍDUOS NO CENTRO POLITÉCNICO (UFPR)	49
FIGURA 7 – PILHA DE TRONCOS AMOSTRADOS	50
FIGURA 8 – COMPARTIMENTOS DE RESÍDUOS COLETADOS SEPARADAMENTE	51
FIGURA 9 – COLETA INDIVIDUAL DOS TRÊS LOTES DE RESÍDUOS	51
FIGURA 10 – INCINERADOR NO PÁTIO DO NPDEAS.....	58
FIGURA 11 – UNIDADE DE FBR	59
FIGURA 12 – PRODUÇÃO LABORATORIAL DE NUTRIENTES DA SUINOCULTURA.....	61
FIGURA 13 – CENTRÍFUGA <i>US CENTRIFUGE SYSTEM M512</i>	63
FIGURA 14 – ASPECTO DA BIOMASSA DE MICROALGAS	63
FIGURA 15 – ESTUFA PARA SECAGEM TÉRMICA DA BIOMASSA	64
FIGURA 16 – ASPECTO DA BIOMASSA MICROALGAL DURANTE E APÓS A SECAGEM TÉRMICA	64
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DE OBTENÇÃO DE EXTRATOS DE BIOMASSA MICROALGAL	69
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS PARA A ANÁLISE PELO MÉTODO DPPH.....	71
FIGURA 19 – PREPARAÇÃO DOS TUBOS DE DIGESTÃO	73
FIGURA 20 – PROCESSO DE DIGESTÃO	73
FIGURA 21 – PROCESSO DE DESTILAÇÃO	74
FIGURA 22 – PROCESSO DE TITULAÇÃO.....	75
FIGURA 23 – RELAÇÃO TEÓRICA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM FUNÇÃO DA UMIDADE	92
FIGURA 28 – CURVA DE PADRONIZAÇÃO DO TROLOX ($\mu\text{mol TE/g}$)	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – GASES POLUENTES, IMPACTOS E EFEITOS PARA A SOCIEDADE	22
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DA ESPÉCIE <i>Tetradismus obliquus</i>	29
TABELA 3 – TAXA DE REMOÇÃO DE COMPONENTES DE ÁGUAS RESIDUAIS POR <i>Tetradismus obliquus</i>	30
TABELA 4 – TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA UTILIZANDO MICROALGAS COMO AGENTES BIORREMEDIADORES DE GASES DE EXAUSTÃO	32
TABELA 5 – REVISÃO DE TRABALHOS SOBRE FIXAÇÃO DE CO ₂ POR MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIORREACTORES	34
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO INCINERADOR RGL 200 S	56
TABELA 7 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MEIO SINTÉTICO CHU	59
TABELA 8 – DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DAS AMOSTRAS AVALIADAS	69
TABELA 9 – ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA E UMIDADE DAS AMOSTRAS DE TRONCOS ANALISADAS	79
TABELA 10 – RESULTADOS DO PODER CALORÍFICO PARA 15 AMOSTRAS DE TRONCOS	82
TABELA 11 – ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA E UMIDADE DAS AMOSTRAS DE GALHOS, FOLHAS E GALHOS COM FOLHAS	83
TABELA 12 – RESULTADOS DO PODER CALORÍFICO PARA AMOSTRAS DE GALHOS, FOLHAS E GALHOS COM FOLHAS	86
TABELA 13 – RESULTADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS ANALISADAS	88
TABELA 14 – RESULTADOS DA AQI E PODER CALORÍFICO PARA OS 3 BLENDS DE AMOSTRAS ANALISADOS	90
TABELA 15 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DOS BLENDS (EM % DE MASSA)	94
TABELA 16 – RESULTADOS DE AQI, ANÁLISE ELEMENTAR E PCS (TEÓRICO) DE BIOMASSA DE MICROLAGAS DE ESPÉCIES DO GÊNERO <i>Scenedesmus</i>	96
TABELA 17– ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DA BIOMASSA SECA DE MICROALGAS	97

TABELA 18 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA DE <i>Tetrademus obliquus</i>	98
TABELA 19 – ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO EM AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS	98
TABELA 20 – FÓRMULAS EMPÍRICAS E COMPOSIÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA DE BIOMASSA DE MICROAGAS E <i>BLENDS</i> DE RESÍDUOS FLORESTAIS	101
TABELA 21 – MASSA TEÓRICA DE RESÍDUOS FLORESTAIS PARA PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM FBR'S DE 12.000 L.....	101
TABELA 22 – DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS E SUAS RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO	103
TABELA 23 – DETERMINAÇÃO PROTEICA PELOS MÉTODOS KJELDAHL E ELEMENTAR (DUMAS)	106
TABELA 24 – TRABALHOS DESTAQUES PUBLICADOS AO LONGO DA TESE	108

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTS	– 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)
ACV	– Avaliação do Ciclo de Vida
AOAC	– Association of Official Analytical Chemists
AQI	– Análise Química Imediata
ASTM	– American Society for Testing and Materials
bs	– Base seca
cél.mL ⁻¹	– Célula por mililitro
CF	– Carbono Fixo
CONAMA	– Conselho Nacional do Meio Ambiente
cr	– Conforme recebido
CZ	– Cinzas
DPPH	– 1,1-difenil-2-picrilhidrazil
EDS	– Espectroscopia de Dispersão de Energia
ESG	– <i>Environmental, Social and Governance</i>
FAO	– Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FBR	– Fotobiorreatores
fsm	– Fração Solúvel em Metanol
GEE	– Gases de Efeito Estufa
g L ⁻¹	– Grama por litro
ISO	– International Organization for Standardization
k	– Fator de conversão
M	– <i>Moisture</i> – Teor de umidade
mesh	– Malha
MEV	– Microscopia Eletrônica de Varredura
m_f	– Massa final
m_i	– Massa inicial
μmol TE g ⁻¹	– Micromolar de equivalentes de Trolox por grama
m s ⁻¹	– Metro por segundo
MV	– Material Volátil
NBR	– Norma Brasileira Regulamentadora
NPDEAS	– Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável
O	– Oxigênio
ODS	– Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	– Organização das Nações Unidas
PC	– Poder Calorífico
PCI	– Poder Calorífico Inferior
pH	– Potencial Hidrogeniônico
PCS	– Poder Calorífico Superior
PNRS	– Política Nacional de Resíduos Sólidos
rpm	– Rotação por minuto
RSU	– Resíduos Sólidos Urbanos
RSO	– Resíduos Sólidos Orgânicos
s	– Desvio padrão
SUINFRA	– Superintendência de Infraestrutura
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
$\bar{x}$	– Média

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	INTRODUÇÃO AO TEMA.....	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA	20
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	23
2.2.1	Resíduos sólidos orgânicos (RSO).....	23
2.3	MICROALGAS	25
2.3.1	Aplicações e potencial energético das microalgas	26
2.3.2	A espécie <i>Tetrademus obliquus</i> (Turpin) M.J.Wynne	29
2.4	APLICAÇÃO DE MICROALGAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIAÇÃO DE GASES DE EXAUSTÃO	31
2.4.1	Produtividade de biomassa de microalgas e fixação de CO ₂	33
2.5	UTILIZAÇÕES E APLICAÇÕES DA BIOMASSA DE MICROALGAS.....	34
2.5.1	Potencial antioxidante	36
2.5.2	Alimentos à base de proteína derivada de microalgas.....	37
2.6	SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	39
2.6.1	Sistemas abertos	39
2.6.2	Sistemas fechados - fotobiorreatores	40
2.7	CULTIVO DE MICROALGAS NO NPDEAS	41
2.8	ESG PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	43
3	DESAFIOS E OBJETIVOS.....	45
3.1	DESAFIOS	45
3.2	OBJETIVOS	45
3.2.1	Objetivo geral	46
3.2.2	Objetivos específicos	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS PROVENIENTES DE PODA E MANUTENÇÃO DA UFPR	47
4.1.1	Coleta dos resíduos florestais dos <i>campi</i> UFPR	47
4.1.2	Coleta das amostras de resíduos florestais para realização das análises.....	49
4.1.3	Análise físico-química dos resíduos florestais.....	52

4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS ACOPLADO A TRATAMENTO DE EMISSÕES POR MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIOREATORES INDUSTRIAIS	55
4.2.1	Sistema de incineração de resíduos florestais	55
4.2.1.1	Produção de CO ₂ pelo incinerador	57
4.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE MICROALGAS CULTIVADA NOS FOTOBIOREATORES INDUSTRIAIS	64
4.3.1	Análise química imediata e poder calorífico da biomassa microalgal bruta e residual	65
4.3.2	Análise elementar da biomassa seca microalgal.....	65
4.3.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) das biomassas brutas e residuais	66
4.4	FIXAÇÃO DE CO ₂ EM FBR	66
4.5	AVALIAÇÃO ANTIOXIDANTE DE BIOMASSA MICROALGAL SECA	67
4.5.1	Obtenção das amostras	68
4.5.2	Análise antioxidante pelo método DPPH.....	70
4.6	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROTEÍNAS DE BIOMASSA MICROALGAL	71
4.6.1	Determinação do teor de umidade.....	72
4.6.2	Método Kjeldahl.....	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1	RESULTADOS	77
5.1.1	Entendimento da gestão dos resíduos da UFPR	78
5.1.2	Propriedades físico-químicas.....	78
5.1.3	Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Elétrons (EDS)	94
5.1.4	Propriedades físico químicas da biomassa seca de microalgas	96
5.1.5	Fixação de CO ₂ em FBR.....	99
5.1.6	Atividade antioxidante da biomassa microalgal seca	102
5.1.7	Determinação do teor de proteínas de biomassa microalgal seca	105
5.1.8	Publicações	108
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A – LAYOUT DOS PROCESSOS INTEGRADOS DESENVOLVIDOS NO NPDEAS	131
	APÊNDICE B – IMAGENS DE MEV – ANÁLISE MORFOLÓGICA DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS FLORESTAIS.....	132
	APÊNDICE C – IMAGENS DE EDS EM CAMADAS DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DOS <i>BLENDS</i> DE RESÍDUOS FLORESTAIS ANALISADOS	133

APÊNDICE D – IMAGENS DE MEV – ANÁLISE MORFOLÓGICA DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS	136
APÊNDICE E – IMAGENS DE EDS EM CAMADAS DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS ANALISADAS	137
APÊNDICE F – TABELA COM OS DESTAQUES PUBLICADOS AO LONGO DA TESE	140
ANEXO G – ENTENDENDO O SISTEMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFPR	142

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO AO TEMA

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios contemporâneos, e estão amplamente atribuídas a atividades antrópicas que interferem na concentração de gases de efeito estufa (GEE), como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O), por exemplo. As emissões de GEE, principalmente de CO₂, são devidas à combustão de combustíveis fósseis e têm impactos globais negativos, afetando o mundo todo.

As consequências das mudanças climáticas são vastas, e abrangem prejuízos à saúde humana, infraestrutura urbana, disponibilidade de água, transporte, gestão de resíduos, impactos ecológicos e recursos energéticos. Diante desse cenário, há um crescente interesse no desempenho ambiental de fontes emissoras. Dessa forma, a preocupação com o aquecimento global tem impulsionado práticas voltadas ao desenvolvimento sustentável, conforme destacam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Dentre os ODS, adotados em 2015 na Agenda 2030 da ONU, destaca-se a redução da geração de resíduos sólidos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é fundamental para a redução das emissões de GEE. Acerca de leis nacionais, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil promove tecnologias limpas e incentiva o uso de tecnologias para o aproveitamento energético a partir dos RSU.

Dessa maneira, a gestão inadequada dos RSU pode causar danos ambientais, como contaminação do solo e água e liberação de gases tóxicos. Por outro lado, a gestão adequada desses resíduos pode promover a conservação dos recursos naturais e gerar energia. Uma estratégia que vem sendo aplicada em países Europeus, é a incineração de resíduos florestais, para reaproveitamento energético. Esse processo não só reduz a emissão de gases de efeito estufa, e reduz a ocupação de espaço físico, mas também inclui a geração de energia.

Integrar essa estratégia de aproveitamento energético de resíduos com biotecnologias emergentes pode maximizar ainda mais os benefícios ambientais. As

microalgas, por exemplo, são organismos fotossintéticos unicelulares com potencial para produção de biomassa e bioprodutos de valor agregado. Estas fixam CO₂ e utilizam nutrientes, como nitrogênio e fósforo, tornando-se ideais para tratamento de efluentes e captura de CO₂. Para o cultivo de microalgas, podem ser utilizados fotobiorreatores (FBR) que atendam aos requisitos de crescimento desses organismos. O cultivo fotoautotrófico permite a utilização de luz e CO₂ para formar energia química por meio da fotossíntese.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esse documento encontra-se dividido em oito seções. A primeira seção apresenta a introdução e a organização do documento. A segunda seção mostra a fundamentação teórica e revisão bibliográfica acerca dos assuntos abordados nessa tese: alterações climáticas e emissões de gases do efeito estufa, resíduos sólidos urbanos, microalgas, aplicações de microalgas como agentes de biorremediação de gases de exaustão, novas tecnologias e utilizações de microalgas, sistemas de cultivo de microalgas, cultivo de microalgas pelo Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS), e *Environmental, Social and Governance (ESG)* para o desenvolvimento sustentável. Na terceira seção, apresenta-se os desafios e objetivos propostos. A quarta seção consiste nas metodologias e materiais utilizados nesse trabalho para obtenção dos resultados, que estão apresentados na quinta seção como resultados e discussão. Na sexta parte desse documento são apresentadas as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros, na sétima parte conta com as referências bibliográficas utilizadas ao longo da elaboração do documento, por fim, a oitava parte contém os apêndices e anexo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

O clima está em constante mudança devido a diferentes fatores naturais, porém, um novo fator significativo que tem influenciado cada vez mais o clima do planeta Terra nos últimos 200 anos é a atividade antrópica, sendo que seu impacto resultante é definido como efeito de estufa (Mikhaylov *et al.*, 2020). De acordo com as Nações Unidas, as alterações climáticas referem-se a alterações a longo prazo das temperaturas e dos padrões climáticos. Estas mudanças podem ser naturais, como por exemplo, variações no ciclo solar. Porém, as atividades humanas também contribuem significativamente para as alterações climáticas, principalmente, em razão da queima de combustíveis fósseis que gera emissões de gases do efeito estufa (GEE) e atua como uma manta envolta à volta da Terra. Dessa maneira, retém o calor do sol aumentando as temperaturas. A utilização de gasolina em automóveis, a queima de carvão para aquecimento, a limpeza de terrenos e florestas a deposição de resíduos em aterros são exemplos de atividades que contribuem para emissões de GEE, incluindo gases como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Portanto, a energia, a indústria, os transportes, a agricultura e o uso do solo estão entre os principais emissores (Nações Unidas Brasil, 2020).

O rápido crescimento da população global e os avanços tecnológicos resultaram em um crescimento exponencial da procura por energia. Embora os combustíveis fósseis não sejam considerados sustentáveis e sua utilização acarrete em problemas ambientais, ainda é o principal contribuinte para o setor energético. Com base nas alterações ambientais causadas devido ao elevado índice de emissões de gases poluentes, os governos começaram a propor e implementar estratégias a fim de minimizar as emissões, na tentativa de evitar desastres ambientais. (St'ahel, 2019; Hobbie e Grimm, 2020; Olabi e Abdelkareem, 2022).

A energia é o principal fator de entrada na economia. Ao mesmo tempo, o uso crescente de energia fóssil, (fontes não renováveis), faz aumentar as emissões de GEE, especialmente a emissão de CO₂, que continua sendo a principal substância química da emissão de gases com efeito de estufa. O desejo de combater as alterações climáticas por meio de melhorias na eficiência energética e aumento da

utilização de energias renováveis tem grande impacto nas políticas de países em desenvolvimento. Especificamente, estes países procuram reduzir as emissões de GEE sem desfavorecer o crescimento econômico. Portanto, é necessário desenvolver sistemas indicadores para a avaliação dos perfis de emissão de GEE, que orientem os decisores políticos, apoiando as decisões sobre os investimentos em energias renováveis, desenvolvimento sustentável, modernização industrial, e melhorias da eficiência energética (Zheng *et al.*, 2019). Isto posto, a elaboração de estratégias para reduzir emissões poluentes se torna primordial.

O efeito estufa foi primeiramente relatado por Joseph Fourier em 1827, verificado experimentalmente por John Tyndall em 1861 e quantificado por Svante Arrhenius em 1896. Arrhenius publicou um artigo sobre os efeitos das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa provenientes da geração de energia e do consumo de energia. Este documento destaca que, apesar do contexto energético desafiador em muitos países, as mudanças ambientais globais resultantes da produção de eletricidade e do consumo de energia estão se tornando um fenômeno globalmente desorganizado. O efeito estufa ocorre devido à interação da energia solar com gases como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e gases fluorados presentes na atmosfera. Esses gases, têm a capacidade de absorver calor e transferi-lo para a superfície terrestre, aumentando a temperatura do planeta. Esse processo, semelhante ao funcionamento de uma estufa, é a razão pela qual esses gases são chamados de GEE. Os principais gases responsáveis por esse efeito são o CO₂, CH₄, N₂O e gases fluorados (Singh, 2024).

Os hidrocarbonetos, como petróleo, o carvão e o gás natural foram a principal fonte de energia da humanidade ao longo do último século. No entanto, a ameaça contínua das mudanças climáticas e seus impactos na saúde e no bem-estar humano intensificaram a necessidade de buscar fontes alternativas de energia. Os hidrocarbonetos ainda respondem por mais de 80 % da oferta mundial de energia. Além disso, a produção e o consumo de combustíveis fósseis são responsáveis por uma parcela significativa (89 %) das emissões globais de gases de efeito estufa, incluindo o dióxido de carbono (Farghali *et al.*, 2022).

A dependência de combustíveis fósseis importados também compromete a segurança energética (Chen *et al.*, 2022; Garba *et al.*, 2021). A fim de enfrentar esses desafios é fundamental o desenvolvimento e a adoção de tecnologias baseadas em energia renovável para assegurar um futuro energético sustentável.

Várias formas de energia renovável possuem um potencial significativo para contribuir com a matriz energética global. Em consonância com essa tendência, observa-se um aumento na utilização de fontes de energia renováveis (Farghali *et al.*, 2023).

Na TABELA 1, apresentada a seguir, são apresentados os principais gases poluentes, seus impactos ambientais e os efeitos adversos para a sociedade e a saúde humana. Cada gás listado contribui de maneira distinta para problemas críticos como o aumento do efeito estufa, formação de chuvas ácidas, e poluição do ar, os quais têm consequências diretas na qualidade de vida e no bem-estar das populações.

TABELA 1 – GASES POLUENTES, IMPACTOS E EFEITOS PARA A SOCIEDADE

Gás Poluente	Impacto causado	Efeitos para a sociedade e saúde humana
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Aumento do efeito estufa, mudanças climáticas	Aumento de desastres naturais, impactos na agricultura, migrações forçadas, estresse térmico e doenças relacionadas ao calor.
Monóxido de Carbono (CO)	Interferência no transporte de oxigênio no sangue	Problemas respiratórios, aumento da mortalidade por doenças cardíacas, dores de cabeça, tonturas, envenenamento por CO.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Formação de chuva ácida, problemas respiratórios	Danos à vegetação, degradação de edifícios, irritação nos olhos, nariz e garganta, agravamento de doenças pulmonares e cardiovasculares.
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Formação de ozônio troposférico (<i>smog</i> fotoquímico), chuva ácida	Problemas respiratórios, irritação das vias aéreas, redução da função pulmonar, degradação de ecossistemas aquáticos e terrestres.
Metano (CH ₄)	Aumento do efeito estufa, contribui para mudanças climáticas	Aumento de desastres naturais, impactos na agricultura, migrações forçadas, estresse térmico, doenças relacionadas ao calor.
Compostos Orgânicos Voláteis	Formação de ozônio troposférico (<i>smog</i> fotoquímico), poluição do ar	Problemas respiratórios, irritação dos olhos, nariz e garganta, danos ao fígado, rins e sistema nervoso central.
Particulados	Problemas respiratórios e cardiovasculares, poluição do ar	Aumento da mortalidade, problemas de saúde pública, exacerbação de doenças respiratórias e cardiovasculares, câncer de pulmão.

FONTE: Audi, Ali e Kassem (2020).

A emissão desses poluentes tem impactos significativos na saúde pública e no ambiente, destacando a necessidade de desenvolvimento de políticas ambientais e estratégias de mitigação que visam reduzir a emissão desses poluentes e minimizar seus efeitos nocivos.

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Os RSU são quaisquer resíduos gerados a partir das atividades humanas e são descartados como indesejados. Esses, geralmente, não trazem nenhum valor ao primeiro usuário (Ramachandra *et al.*, 2018). A geração dos RSU é resultado de atividades de variadas origens, como industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, entre outras. Por consequência, a destinação inadequada dos RSU pode gerar diversos prejuízos ambientais, tais como, contaminação do solo e água e liberação de gases tóxicos para a atmosfera. Em contrapartida, o sistema de gestão de RSU atua na coleta, transferência e transporte, processamento e disposição final de acordo com boas práticas de saúde pública, economia, conservação e outras considerações ambientais, com o objetivo de recuperar matéria ou energia (Silva, Fugii e Santoyo, 2017; Ramachandra *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2020).

2.2.1 Resíduos sólidos orgânicos (RSO)

Os resíduos sólidos orgânicos (RSO) são caracterizados por restos de animais ou vegetais descartados a partir das atividades humanas, podendo ter origem doméstica ou urbana (restos de alimentos ou podas), agrícola ou industrial (resíduos provenientes da agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos), de saneamento básico (lamas de depuração), entre outras. Esses resíduos são considerados biodegradáveis, porém, devido às ações humanas, alto volume de geração e descarte inadequado, (principalmente em ambientes urbanos), pode constituir problemas ambientais. No Brasil, os RSO representam 50 % dos resíduos sólidos gerados e, assim como os demais resíduos sólidos, o descarte inadequado de RSO gera chorume, emissão de gases, como CO₂ e CH₄ na atmosfera, além de favorecer a proliferação de vetores de doenças (Ministério Do Meio Ambiente, 2022). Portanto, nesse sentido é imprescindível a adoção de boas práticas de gestão e tratamento desses resíduos.

Resíduos, tais como lama de depuração, resíduos agrícolas, resíduos alimentares e de cozinha, resíduos de jardim, resíduos agroindustriais, resíduos animais, entre outros que podem ser de modo geral classificados como RSO constituídos por fração orgânica biodegradável. A maioria dos países em

desenvolvimento gera altas quantidades de resíduos sólidos representados por uma gestão ineficiente, devido à falta de segregação de resíduos e instalações de eliminação adequadas. A incineração sem tratamento dos resíduos, produzem gases nocivos, resultando em emissões de GEE que pode conduzir como consequência a poluição atmosférica e aquecimento global (Sharma *et al.*, 2019).

O aproveitamento energético da biomassa e de resíduos sólidos orgânicos (RSO) tem sido amplamente investigado como uma alternativa para diversificar a matriz energética e mitigar os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis, especialmente no que se refere às emissões de CO₂ para a atmosfera (Siebeneichler *et al.*, 2017). Embora essas fontes possam contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, sua capacidade de suprir integralmente a demanda energética global é limitada devido à disponibilidade restrita de biomassa e à competição com a produção de alimentos. Além disso, a expansão indiscriminada da produção de bioenergia pode acarretar riscos ambientais significativos, como desmatamento e perda de biodiversidade, se não for conduzida de maneira sustentável (Oliveira e Carneiro, 2020; Silva *et al.*, 2021; Mantovani *et al.*, 2022; Deitos *et al.*, 2024).

Muitos países europeus, detêm de tecnologias e políticas de resíduos sólidos que exploram o reaproveitamento e reduzem consideravelmente a necessidade de destinação à aterros sanitários. Como resultado, a gestão de RSU, é considerada mais eficiente, exigindo encaminhamento de apenas uma parcela dos resíduos para aterros. No entanto, a destinação de resíduos à aterros sanitários, é considerada agressiva, pois requer ampla disponibilidade de espaço físico, além de comprometer o solo, a água e a população do entorno. Atualmente, um dos maiores problemas ambientais, está relacionado à geração de RSU e sua gestão ineficiente. Portanto, a segregação adequada dos resíduos, permite a destinação correta dos materiais orgânicos, evitando seu descartem locais inadequados (Aguiar *et al.*, 2021).

A PNRS, Lei 12.305/2010, prevê no art.3º, inciso VII que a destinação final ambientalmente adequada de resíduos inclui a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Além disso, PNRS, ressalta a classificação dos resíduos sólidos quanto à origem e periculosidade. Dessa forma, os resíduos de limpeza urbana, ou seja, originários da

varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, e outros serviços de limpeza urbana, são classificados como resíduos não perigosos (Brasil, 2010).

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), resolução Nº 481, de 03 de outubro de 2017, art 2º, incisos XI e XIII, respectivamente, define resíduos orgânicos como aqueles representados pela fração orgânica dos resíduos sólidos, passível de compostagem, sejam eles de origem urbana, industrial, agrossilvipastoril ou outra e resíduos sólidos urbanos como: aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas, da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços (Conama, 2017). Dessa forma, no proposto trabalho, os RSO serão tratados como materiais de limpeza pública provenientes de podas, varrição, jardinagem, manutenção em geral da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Dentre as possibilidades de valorização dos RSO previstos na legislação, destaca-se a utilização desses materiais como fonte de carbono para processos biotecnológicos. Nesse contexto, o cultivo de microalgas tem se consolidado como uma alternativa promissora para o aproveitamento energético e ambiental de RSO, unindo estratégias de mitigação de emissões com geração de biomassa de alto valor agregado.

2.3 MICROALGAS

A importância das microalgas nos ecossistemas aquáticos é imensa, dado seu papel como base da cadeia alimentar, capacidade de rápido desenvolvimento, além de serem consideradas componentes essenciais dos recifes de corais. As microalgas são organismos unicelulares, autotróficos, presentes em sistemas aquáticos, que existem individualmente, em cadeias ou em grupos. São organismos fotoautotróficos que convertem diretamente CO₂ em biomassa por meio da fotossíntese, o que se tornou uma tecnologia de captura e utilização de carbono amplamente aceita (LI *et al.*, 2024). Um dos organismos vivos mais antigos, formam a base da cadeia alimentar nos mares e rios, sendo conhecidas como 'plâncton'. Existem mais de 105 tipos de microalgas utilizadas apenas para a produção de biodiesel (Satyanarayana, Mariano e Vargas, 2011; Priyadarshani e Rath, 2012; Taher, 2019).

2.3.1 Aplicações e potencial energético das microalgas

A conservação ambiental e a produção de energia estão entre os maiores desafios atuais da humanidade. Dado o potencial das microalgas em diversas aplicações, sua utilização pode ser uma solução para questões ambientais e energéticas. Em uma economia de base biológica, a biomassa é valorada e utilizada para a produção sustentável de alimentos, rações, produtos químicos, fármacos, cosméticos, combustíveis, energia e calor (Barsanti e Gualtieri, 2018).

Dessa forma, as atenções estão voltadas para as microalgas, que possuem numerosos compostos bioativos que podem ser aproveitados para uso comercial, podendo ser utilizadas para produzir uma vasta gama de metabolitos, tais como proteínas, lipídeos, hidratos de carbono, carotenoides, vitaminas e aditivos alimentares (Priyadarshani e Rath, 2012).

A necessidade pela busca de energia por meio de recursos renováveis é resultado do esgotamento dos recursos naturais e ênfase à mitigação das alterações climáticas e emissões de GEE (Elrayies, 2018). A utilização de microalgas para a produção de bioenergia pode ser uma alternativa sustentável, pois as microalgas são descritas como os recursos mais promissores, devido às suas particularidades vantajosas, tanto em relação ao cultivo quanto aos compostos que podem ser obtidos (Lee, Jalalizadeh e Zhang, 2015).

As microalgas apresentam altas taxas de crescimento celular, capacidade relativamente alta de produção de lipídios e fixação de CO₂. Quando os gases em combustão são adicionados ao cultivo de microalgas, formam diferentes espécies, como o íon carbonato, íon bicarbonato, carbono inorgânico, íon hidrogênio que reage com a água, reduzindo o pH. Esses compostos carbonatos são fixados como nutrientes pelas microalgas que produzem proteínas essenciais para o crescimento celular, lipídeos e carboidratos, podendo ser utilizados posteriormente para a conversão da biomassa em compostos bioativos (Martinez, 2018).

As microalgas podem ser utilizadas na agricultura (biofertilizantes) como fonte de proteína (ração animal). Além disso, o potencial de assimilação de nutrientes realizado pelas microalgas se dá por meio da energia solar e seu cultivo pode ser exequível em qualquer estação do ano (Lee, Jalalizadeh, Zhang, 2015; Scherer *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2020). O cultivo de microalgas é considerado uma ferramenta

eficaz e natural que pode ser utilizada como alternativa para a mitigação de CO₂ e alternativa para produção de energia renovável (Castro *et al.*, 2020; Scherer *et al.*, 2016).

Diferentes mecanismos podem ser utilizados para o cultivo de microalgas em larga escala. Os sistemas de cultivo podem ser classificados em sistemas abertos, como os tanques ou lagoas abertas, fechados como os FBR, ou híbridos. Os sistemas abertos possuem alguns inconvenientes, como perdas por evaporação, requerem maior aporte de água, possuem elevados riscos de contaminação, menor produtividade volumétrica, baixo controle de temperatura. Por outro lado, os sistemas fechados como os FBR requerem maior uso de energia e podem produzir maior quantidade de biomassa. No entanto, sua construção é mais onerosa quando comparada aos sistemas abertos (Scherer *et al.*, 2016). Esses cultivos são aproveitados para biorremediação de contaminantes atmosféricos, esgoto e emissões de queima de combustíveis. Os contaminantes ou gases poluentes são utilizados como nutrientes para as microalgas, dessa forma, o custo é reduzido em relação à utilização de nutrientes sintéticos (Martinez, 2018).

Para gerar um quilograma de biomassa de microalgas, são necessários cerca de 1,8 kg de CO₂. Em outras palavras, a biomassa seca de microalgas contém aproximadamente 50 % de carbono molecular. As células das microalgas são compostas de 50 % de carbono, o que pode produzir 1 kg de biomassa fixando 1,8 kg de CO₂. Estudos recentes demonstram a alta capacidade das microalgas de fixar CO₂ (dióxido de carbono), NO₂ (dióxido de nitrogênio) e SO₂ (dióxido de enxofre), seja a partir de fontes puras ou de emissões industriais. Portanto, fornecer esses gases aos cultivos é uma forma eficaz de aumentar a produção desses microrganismos. Além disso, a fixação e remoção de CO₂ e outros gases prejudiciais ao meio ambiente pelas microalgas atuam como um processo de biorremediação, permitindo um descarte mais responsável e menos prejudicial de resíduos gasosos (Acién *et al.*, 2017; Taher, 2019; Li *et al.*, 2024).

O trabalho de revisão de Elrayies (2018), corrobora com a utilização do potencial energético das microalgas cultivadas em FBR para a obtenção de insumos e geração de energia. Essa revisão aponta potenciais aplicações da biomassa microalgal e benefícios do sistema de FBR na captura de CO₂, além de sugerir a utilização dos FBR microalgais como instalações de bio-fachadas em cidades e edifícios para sequestro de CO₂ e simultaneamente produção de biocombustíveis e

energia elétrica. O custo benefício desse processo seria considerado a longo prazo. Ainda corroborando com o potencial energético e aplicações sustentáveis das microalgas, o trabalho realizado por Choi e colaboradores (2022) relata que as microalgas estão recebendo atenção substancial como plataformas biológicas prospectivas para a redução prática do CO₂ e para o estabelecimento de cadeias de abastecimento renovável e sustentável.

No estudo Elrayies (2018), é apresentada a eficiência energética e de redução de CO₂ desta estratégia em comparação a outras vias de produção tradicionais, visando a proporcionar uma oportunidade de reconsiderar o potencial e a praticabilidade de estratégias de utilização de biomassa microalgal. Visto isso, o cultivo de microalgas pode ser rentável para a indústria biotecnológica e em paralelo, ambientalmente vantajoso, devido a sua utilização para geração de energia, redução de emissões poluentes a atmosfera e redução na exploração de recursos naturais, como por exemplo a utilização da biomassa seca como bioinsumo para a indústria cosmética e farmacêutica.

As microalgas podem ter outras aplicações como o tratamento de águas residuais e simultânea produção de lipídeos, proteínas e hidratos de carbono direcionados à geração de energia. Morais (2021), relata em seu trabalho que as microalgas também são fonte promissora de outros compostos de valor agregado, com elevado potencial para aplicações biotecnológicas. Ou seja, a partir destas, é possível obter metabólitos secundários como pigmentos, ácidos graxos e antioxidantes. Dentre estes, estão clorofilas, carotenoides, flavonoides, fenóis e ficobilinas. Ademais, os metabólitos secundários, podem ser utilizados na indústria cosmética, alimentícia e farmacêutica, uma vez que são mais seguros quando comparados a seus equivalentes sintéticos. Esses metabólitos secundários possuem atividades antioxidantes e anti-inflamatórias, podendo contribuir para prevenção de alergias, doenças cardíacas, câncer e doença de Alzheimer. As aplicações dos metabólitos secundários extraídos da biomassa microalgal, podem variar de acordo com a espécie de microalga utilizada e método de extração (Morais *et al.*, 2021). Portanto, a utilização das microalgas para tratamento de águas residuais é uma técnica economicamente viável, em que todas as etapas de um processo estão ligadas de modo a reutilizar e acrescentar valor aos resíduos, podendo ser considerado um processo de economia circular.

Acerca deste tema, a biomassa de microalgas oferece inúmeras oportunidades para o desenvolvimento sustentável de diversas indústrias, sendo sua utilização crucial para impulsionar o desenvolvimento global sustentável. Assim, a exploração e o uso da biomassa de microalgas podem proporcionar soluções sustentáveis para diversos setores industriais, promovendo uma economia mais verde e reduzindo a dependência de recursos fósseis e/ou exploração de outros recursos naturais (Oliveira *et al.*, 2022).

2.3.2 A espécie *Tetradismus obliquus* (Turpin) M.J.Wynne

A espécie *Tetradismus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne, pertencente ao Filo Chlorophyta, é atualmente reconhecida como a nomenclatura científica válida para este organismo. Esta microalga possui diversos sinônimos taxonômicos, incluindo *Achnanthes obliqua*, *Scenedesmus obliquus*, *Acutodesmus obliquus*, *Scenedesmus acutus*, *Scenedesmus bijugatus*, *Scenedesmus acutus* f. *alternans*. A nomenclatura de *Scenedesmus obliquus* para *Tetradismus obliquus* foi formalizada por M.J Wynne, seguindo critério de revisão taxonômica. Atualmente, a base de dados AlgaBase reconhece *Tetradismus obliquus* como o nome aceito, mantendo *Scenedesmus obliquus* como um dos sinônimos. Diversos autores recentes já adotaram essa classificação em publicações científicas. Essa espécie de microalga de água doce apresenta ampla distribuição geográfica, sendo encontrada em ecossistemas aquáticos de diferentes regiões do mundo (Algae Base).

A espécie de microalga *Tetradismus obliquus* (Turpin) M.J.Wynne, vem sendo utilizada pelo grupo de pesquisa do NPDEAS e foi inicialmente isolada a partir da água da rede de abastecimento local. Essa espécie possui sua nomenclatura correta e atualmente aceita, de acordo com o apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DA ESPÉCIE *Tetradismus obliquus*

Reino	Plantae
Filo	Chlorophyta
Classe	Chlophyceae
Ordem	Sphaeropleales
Família	Scenedesmaceae
Gênero	<i>Tetradismus</i>
Espécie	<i>Tetradismus obliquus</i> (Turpin) M.J.Wynne

FONTE: Algae Base (2022).

Tetradismus obliquus é considerada uma espécie de ótimo desempenho na remoção de nutrientes de águas residuais urbanas e produtividade de biomassa (Morais *et al.*, 2021). As microalgas têm a capacidade de fixar CO₂ e reduzir as emissões de gases causadores do aquecimento global, sendo seu uso para esse propósito considerado renovável, sustentável e ambientalmente apropriado (Zhao *et al.*, 2015; Ringsmuth, Landsberg e Hankamer, 2016). *Tetradismus* spp. são consideradas microalgas tolerantes à poluição e a drogas (medicamentos), sendo *T. obliquus* assim, uma espécie de microalga eficiente na remoção de medicamentos e pesticidas de águas residuais (Morais *et al.*, 2021), conforme apresentado na TABELA 3.

TABELA 3 – TAXA DE REMOÇÃO DE COMPONENTES DE ÁGUAS RESIDUAIS POR *Tetradismus obliquus*

Componente	Classificação	Remoção (%)
Diclofenaco	Anti-inflamatório	79 %
Progesterona e Norgestrel	Hormônios	95 %
Enrofloxacina	Antibiótico (uso veterinário)	22 %
Sulfametazina	Antibiótico	62 %
Sulfametoxazol	Antibiótico	46 %
Carbamazepina	Utilizado para o tratamento de epilepsia	30 %
Dimetomorfe	Pesticida	24 %
Pirimetanil	Pesticida	7 %

FONTE: Adaptado de Moraes *et al.*, (2021).

Demonstrando a ampliação da capacidade e aplicabilidade da biomassa *Tetradismus obliquus*, o trabalho de Lirio (2019), avaliou o emprego da biomassa dessa espécie de microalga como fonte alternativa na suplementação de rações caninas comerciais. Os resultados obtidos mostram que é eficaz para ser utilizada como suplemento alimentar na ração canina e pode trazer benefícios para a saúde dos animais, sendo uma fonte natural, de origem sustentável, composta por elementos nutricionais tais como proteínas, lipídeos, fibras, elemento do grupo ômega 3 (ácido alfa linolênico) e cargas minerais. Ainda nesse estudo, de acordo com os compostos caracterizados a partir da biomassa estudada, avalia-se a possibilidade de ser destinada para formulações voltadas a populações específicas, nomeadamente cardíacos ou obesos, pois nos cães machos, foi observada a redução de 20 % nos níveis de colesterol do sangue, além de ter sido mantido o peso corporal. Ademais, não foram detectados sinais de toxicidade.

Outro estudo que corrobora com o potencial de aplicabilidade da espécie, foi a pesquisa conduzida por Afify *et al.* (2018) que investigou a atividade antioxidante e antiviral de proteínas hidrolisadas extraídas da microalga *Tetradismus obliquus*. O estudo demonstrou que as proteínas extraídas da alga foram hidrolisadas usando três diferentes enzimas: papaína; tripsina; e pepsina. Os extratos proteicos resultantes foram então avaliados quanto à sua atividade antioxidante. Os testes de atividade antioxidante foram realizados utilizando dois métodos principais: a capacidade de eliminação de radicais livres DPPH (1,1-difenil-2-picrilhidrazil); e a capacidade antioxidante total de 2,2'-azinobis(3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico) (ABTS). Os resultados indicaram que os hidrolisados proteicos apresentaram uma forte atividade antioxidante. A correlação de Pearson mostrou uma forte correlação positiva entre as atividades antioxidante e antiviral, sugerindo que as propriedades antioxidantes dos hidrolisados proteicos podem contribuir para sua eficácia antiviral. Portanto, o estudo concluiu que as proteínas hidrolisadas de *Tetradismus obliquus* não só têm potencial antioxidante significativo, mas também podem ser úteis no desenvolvimento de terapias antivirais.

2.4 APLICAÇÃO DE MICROALGAS COMO AGENTES DE BIORREMEDIAÇÃO DE GASES DE EXAUSTÃO

As microalgas possuem a capacidade de capturar CO₂ e contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, sendo amplamente estudadas como uma alternativa para a remoção desse gás de exaustão. Diversos modelos foram propostos para a utilização de microalgas na captura de CO₂ de emissões provenientes de usinas termelétricas e outras fontes industriais. Estudos indicam que certas espécies de microalgas apresentam taxas de crescimento elevadas em atmosferas enriquecidas com CO₂, geralmente entre 10 % e 20 %, quando fornecido a partir de fontes purificadas. No entanto, em gases de exaustão industriais ('*flue gas*'), a concentração de CO₂ varia entre 5 % e 15 %, dependendo do tipo de combustível utilizado e da tecnologia de combustão empregada. A injeção direta desses gases no meio de cultivo reduz os custos de pré-tratamento, mas pode expor as microalgas a condições extremas, como a presença de compostos químicos inibitórios em grandes quantidades, altas temperaturas e elevadas concentrações de

CO₂, exigindo estratégias adaptativas para viabilizar o cultivo em larga escala (Pires *et al.*, 2012; Özel *et al.*, 2019; Taher *et al.*, 2021).

Conforme apresentado na TABELA 4, foi realizado um levantamento de trabalhos encontrados na literatura envolvendo microalgas, captura e nutrição por gases de exaustão.

TABELA 4 – TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA UTILIZANDO MICROALGAS COMO AGENTES BIORREMEDIADORES DE GASES DE EXAUSTÃO

Espécie	Fonte de emissão	Sistema de cultivo	Iluminação	Referência
<i>Chorella</i> (LAMB 31)	Gás combustão de usina de energia (queima de carvão)	FBR	Artificial -10 horas	Li <i>et al.</i> , (2024)
<i>Scenedesmus</i> sp	Gás de combustão	Aberto	-	Guruvaiah e Lee, (2014)
<i>Nephroselmis</i> sp (KGE8) e <i>Acutodesmus obliquus</i> (KGE 17 e KGE 32)	Gases de exaustão de usinas termoeletricas	FBR (2000 L)	-	Park <i>et al.</i> , (2019)
<i>Scenedesmus</i> spp.	Incubador de CO ₂	FBR's (50 mL)	Artificial	Zaharieva <i>et al.</i> , (2022)
<i>Chlorella</i> sp. (MTF-15)	Gases de combustão de usina de energia	24 FBR's (50 L cada)	Artificial	Kao <i>et al.</i> , (2014)
<i>Arthrospira platensis</i> (<i>Spirulina platensis</i>)	Gases de combustão formados em centrais elétricas industriais de pistão a gás	FBR (1 L)	Artificial	Vlaskin <i>et al.</i> , (2023)
<i>Arthrospira platensis</i> (<i>Spirulina platensis</i>)	Emissões agrícolas (simulação de gases de exaustão)	FBR (1000 L)	Artificial (iluminação contínua)	Glockow <i>et al.</i> , (2023)
<i>Chlorella sorokiniana</i> (UTEX 2714)	Gases de combustão industrial	FBR (10 L)	Natural	Lee, Lee e Sim, (2023)
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	Gases de combustão	FBR (Erlenmeyer 2 L)	Artificial	Faruque, Hossain e Razzak, (2023)
<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Scenedesmus obliquus</i> , <i>Psammothidium</i> sp., e <i>Monoraphidium contortum</i>	Gases de combustão (centrais térmicas)	FBR (coluna tubular vertical e frascos de vidro)	Artificial	Aghaalipour, Akbulut e Güllü, (2020)
<i>Chlorella vulgaris</i> UTEX 2714	Gases de combustão	FBR (500 L)	Artificial	Dębowski <i>et al.</i> , (2021)
<i>Chlorella</i> sp. HS2	Gases de exaustão de motora a diesel	FBR tanque (10 L)	Natural	Mallick <i>et al.</i> , (2024)

<i>Chlorella sp.</i>	Gases de exaustão de biocombustíveis	7 FBR's <i>airlift</i> (5 L cada)	-	Admirasari <i>et al.</i> , (2023)
----------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---	-----------------------------------

FONTE: A autora (2024).

Apesar de haver estudos que envolvam microalgas de diferentes espécies e a captura de gases de exaustão, conforme apresentado na TABELA 4, nenhum destes aborda de forma integrada os processos realizados em escala industrial. Nas pesquisas, não foram encontrados trabalhos que englobam a utilização de FBR em escala industrial acoplados à incineração de resíduos florestais, conforme os métodos aplicados nesta tese.

2.4.1 Produtividade de biomassa de microalgas e fixação de CO₂

A produção de biomassa de microalgas em FBR's tem sido amplamente estudada devido ao seu potencial para a fixação de CO₂ e a geração de biomassa rica em compostos de alto valor agregado, como proteínas, lipídios e carboidratos. Essa abordagem se destaca como uma estratégia promissora para mitigar emissões de carbono enquanto possibilita a produção sustentável de biocombustíveis e outros bioprodutos (Fu *et al.*, 2019).

A eficiência na conversão de CO₂ e a produtividade de biomassa variam entre as espécies de microalgas e os diferentes sistemas de cultivo empregados (Watanabe e Hall, 1996). Um exemplo é *Scenedesmus obliquus*, que alcançou uma taxa de fixação de CO₂ de 1546,7 mg/L/dia sob condições potencializadas (Ho *et al.*, 2013). Já a espécie *Chlorella sp.* apresentou taxas de absorção de CO₂ entre 0,261 e 0,573 g/h, dependendo da concentração inicial de dióxido de carbono disponível no meio de cultivo (Chiu *et al.*, 2008).

A produtividade de biomassa também varia conforme o sistema de cultivo adotado. Estudos indicam que *Spirulina platensis* obteve uma produtividade de 15,9 g de biomassa seca por metro quadrado por dia em um FBR cônico, apresentando uma eficiência fotossintética de 6,83 % (Watanabe e Hall, 1996). Em outro estudo, *Coelastrum sp.*, cultivada sob concentração elevada de CO₂ (12 %), demonstrou um rendimento de biomassa de 0,267 g/L/dia e uma taxa de fixação de CO₂ de 0,302 g/L/h (Mousavi *et al.*, 2018).

Na TABELA 5 é apresentado um resumo dos principais dados encontrados na literatura sobre produtividade de biomassa e taxas de fixação de CO₂ para diferentes espécies de microalgas cultivadas em FBR. Esses resultados evidenciam a variabilidade da eficiência de cultivo, destacando que a escolha da espécie e do sistema de cultivo pode influenciar na produção de biomassa e do sequestro de carbono.

TABELA 5 – REVISÃO DE TRABALHOS SOBRE FIXAÇÃO DE CO₂ POR MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIOREATORES

Espécie	Rendimento de biomassa	Fixação de CO ₂	Escala de produção	Referência
<i>Tetrademus obliquus</i>	1,4 g/mL	Não informado	Laboratorial (12 L)	Taher, (2013)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	0,36 g/L/dia	0,44 kg/m ³ /dia	Laboratorial	Deprá <i>et al.</i> (2020)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3,74 – 7,01 g/L	0,77 g/L/dia	Laboratorial	Bagchi e Malick, (2016)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	0,76 g/L	0,27 g/L/dia	Laboratorial	Liu <i>et al.</i> (2020)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3,74 g/L	1,55 g/L/dia	Laboratorial	Ho <i>et al.</i> (2013)
<i>Tetrademus obliquus</i>	1,87 g/L	Não informado	Industrial (100 L)	Sinha <i>et al.</i> (2021)
<i>Chlorella sp.</i>	0,76 – 0,87 g/L	0,261 – 0,573 g/h	Laboratorial	Chiu <i>et al.</i> (2008)
<i>Spirulina platensis</i>	15,9 g/m ² /dia	Não informado	Laboratorial	Watanabe e Hall, (1996)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	0,0049 g/L/dia	0,096 mol CO ₂ /20h	Laboratorial	Kargupta <i>et al.</i> (2015).
<i>Coelastrum sp.</i>	0,267	0,302	Laboratorial	Mousavi <i>et al.</i> , (2018)

FONTE: A autora (2025).

2.5 UTILIZAÇÕES E APLICAÇÕES DA BIOMASSA DE MICROALGAS

As microalgas têm se destacado em diversas inovações tecnológicas, impulsionando avanços significativos no campo da biotecnologia. Uma área de destaque é a produção de biocombustíveis, que representam alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis tradicionais. A utilização de microalgas na biorremediação também tem ganhado importância, uma vez que esses organismos têm capacidade de tratar águas residuais, removendo poluentes (Penloglou, Pavlov e Kiparissides, 2024; Mata, Martins e Caetano, 2010).

No setor alimentício, as microalgas são altamente valorizadas por seu elevado conteúdo de proteínas, vitaminas e ácidos graxos essenciais, como o ômega-3, tornando-as suplementos nutricionais de grande interesse. Além disso, as microalgas, por suas propriedades antioxidantes e regenerativas, podem ser incorporadas em produtos de valor agregado a indústria cosmética (Mosibo, Ferrentino e Udenigwe, 2024).

Uma aplicação promissora das microalgas é na produção de biopolímeros, oferecendo uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais. A integração de microalgas em sistemas de cultivo em FBR, tem aprimorado a eficiência da produção, maximizando a utilização da luz e dos nutrientes, demonstrando grande potencial para a industrialização e escalabilidade dessas tecnologias. Essas tecnologias e aplicações reforçam o potencial das microalgas como recursos sustentáveis, alinhando-se com os objetivos de desenvolvimento sustentável e a promoção da inovação tecnológica (Gupta e Choi, 2015; Penloglou, Pavlov e Kiparissides, 2024).

Além dessas aplicações, a biomassa de microalgas tem se mostrado uma alternativa sustentável para o agronegócio, especialmente na produção de biofertilizantes, biopesticidas e biostimulantes. Estudos recentes indicam que as microalgas podem ser utilizadas como substitutas de fertilizantes químicos convencionais, promovendo um ciclo mais eficiente de nutrientes no solo, ao mesmo tempo em que reduzem a contaminação ambiental (Çakirsoy, Miyamoto e Ohtake, 2022). Essa abordagem se alinha com práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo para a redução da dependência de fertilizantes sintéticos e aumentando a resiliência dos solos agrícolas (Gautam *et al.*, 2021).

Outro aspecto relevante do uso de microalgas no setor agrícola é a reciclagem de nutrientes a partir de efluentes industriais e urbanos, o que permite a remoção de metais pesados, nutrientes e toxinas da água enquanto se produz biomassa de alto valor agregado. Esse processo, conhecido como phycoremediação, demonstra a capacidade das microalgas, em especial, *Chlorella* sp., *Ankistrodesmus* sp., *Scenedesmus* sp., *Chlamydomonas* sp., *Oocystis* sp., *Arthrospira platensis* e *Calothrix* sp., de sequestrar carbono e reduzir a concentração de compostos nitrogenados e fosfatados das águas, tornando-as viáveis para reuso na irrigação e no melhoramento da qualidade do solo (La Bella *et al.*, 2022).

Estudos também apontam para o potencial das microalgas como complemento na alimentação animal, oferecendo uma fonte rica em proteínas e ácidos graxos essenciais para nutrição de aves, peixes e ruminantes (Siedenburg, 2022). Essas aplicações são particularmente relevantes para reduzir a pressão sobre os sistemas convencionais de produção de ração, que dependem fortemente da soja e de outros insumos agrícolas.

Além disso, pesquisas recentes demonstram que a biomassa microalgal pode contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, atuando tanto na redução de emissões de CO₂ quanto na produção de bioprodutos para diferentes cadeias industriais. A incorporação de microalgas nos sistemas agroindustriais pode auxiliar na captura de carbono e na geração de produtos sustentáveis, criando novas oportunidades para um modelo de economia circular (Gonçalves *et al.*, 2023).

Portanto, o uso da biomassa de microalgas abrange diversas frentes tecnológicas e industriais, tornando-se uma alternativa versátil e promissora para setores que buscam promover a sustentabilidade alinhando-se com as práticas ESG. Seja na produção de biocombustíveis, na agricultura, na indústria de alimentos e cosméticos ou na mitigação de impactos ambientais, as microalgas se consolidam como um recurso estratégico para o desenvolvimento sustentável e a inovação tecnológica.

2.5.1 Potencial antioxidante

A aplicação de microalgas e operações unitárias, visam minimizar esforços e custos científicos na busca por substratos menos onerosos e mais sustentáveis. Utilizar integralmente as biomoléculas sintetizadas pelas microalgas, como proteínas, lipídios, hidratos de carbono entre outros de elevado valor (carotenoides, astaxantina, antimicrobianos, antivirais, antifúngicos), pode tornar a tecnologia de microalgas competitiva. A aplicação de várias espécies de microalgas como biomassa seca ou extratos e seus compostos bioativos tem sido utilizada há muito tempo na criação de animais, especialmente na avicultura, para melhorar a saúde e o desempenho devido às suas propriedades nutricionais, imunoestimuladoras, antioxidantes e antibacterianas. As espécies de microalgas mais usadas para este fim são *Chlorella* e *Spirulina* spp. Considerando a crescente necessidade de limitar o

uso de antibióticos como promotores de saúde devido à resistência bacteriana, é ainda mais urgente buscar novas oportunidades para substituir práticas existentes por regimes alimentares mais saudáveis (Zaharieva *et al.*, 2022).

Devido ao potencial na síntese de compostos biologicamente ativos de *Scenedesmus obliquus*, o estudo de Zaharieva *et al.*, (2022) avaliaram extratos de biomassa dessa espécie de microalga. Esse estudo foi realizado em escala laboratorial. As etapas de inoculação e produção verificaram as hipóteses de alcançar a máxima utilização de CO₂, com a finalidade de reunir esforços para minimizar as emissões de CO₂ de gases industriais residuais, além de obter alta concentração de biomassa. A combinação de LEDs de cor interna e externa é muito promissora quando aplicada na fase de produção em termos da síntese de metabolitos secundários. Em relação à produção de biopigmentos, a aplicação de luz verde ou vermelha interna resultou em carotenoides totais entre 5 e 5,5 mg/g de peso seco nos FBR de 50 mL (1 e 2), o que é um resultado promissor para *Scenedesmus* spp. A aplicação de soluções de engenharia para criar FBRs na fase de inoculação resultou em biomassa de qualidade da cepa de *Scenedesmus obliquus*, representando uma fonte para extratos e compostos com significativo potencial antibacteriano em combinação com antibióticos de uso clínico e óleo de orégano, bem como propriedades antioxidantes. Os extratos investigados podem servir como base para o desenvolvimento de nutracêuticos promotores de saúde para uso como aditivos a uma dieta clássica ou medicamentos antibacterianos na indústria avícola.

2.5.2 Alimentos à base de proteína derivada de microalgas

As proteínas são macronutrientes essenciais na alimentação humana, envolvidos em processos biológicos (como contração muscular, reparo de tecidos e reações metabólicas). As principais fontes de proteína na dieta são de origem animal e vegetal. A produção de proteína animal, depende de proteínas vegetais na alimentação animal. Por outro lado, as proteínas vegetais são mantidas pela expansão e diversificação das áreas de cultivo e pelo aumento do rendimento das colheitas. Este cenário provoca debates sobre a degradação da terra, perda de biodiversidade e desmatamento, exacerbando os danos ambientais e as mudanças

climáticas. Essa realidade destaca a necessidade de fontes de proteína sustentáveis (Mosibo, Ferrentino e Udenigwe, 2024).

As microalgas são produtores primários nas cadeias alimentares aquáticas e estão se expandindo continuamente em diversos setores industriais, principalmente no que diz respeito a energias renováveis, pigmentos farmacêuticos, tratamento de águas residuais, alimentos e rações (Ansari *et al.*, 2021).

A produção de alimentos não acompanha o crescimento da demanda, além dos impactos ambientais negativos do sistema tradicional de fornecimento de alimentos, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa, uso excessivo de pesticidas e ocupação de terras e água doce. A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) alerta que será difícil suprir as necessidades alimentares de quase 10 bilhões de pessoas até 2050 (Fao, 2021; Janssen, Wijffels e Barbosa, 2022).

As microalgas tornaram-se culturas importantes para as indústrias globais de alimentos e bebidas, aquicultura e nutrição animal e humana. As razões se devem ao: (i) alto teor de proteínas, aminoácidos essenciais, vitaminas, antioxidantes, ômega 3 e minerais; (ii) sustentabilidade a longo prazo (devido a menores pegadas de carbono, água e terra arável de todas as culturas); (iii) remediação da poluição ambiental; (iv) alta produtividade em comparação com culturas terrestres e alimentos para animais. As proteínas de algas vêm sendo utilizadas como produtos alimentares, alimentos para animais e aquicultura, suplementos alimentares, produtos farmacêuticos e cosméticos (Wang, Tibbetts e McGinn, 2021).

O uso de microalgas como fonte de proteína tem ganhado atenção devido à sua alta eficiência fotossintética e perfil nutricional. Estudos demonstram que as microalgas podem ser incorporadas em uma ampla variedade de produtos alimentícios, como suplementos dietéticos, substitutos de carne, produtos de panificação, e bebidas, proporcionando benefícios nutricionais adicionais como fibras alimentares e antioxidantes naturais (Severo *et al.*, 2024). No entanto, a qualidade e segurança dessa biomassa estão diretamente relacionadas às condições de cultivo.

Além das aplicações em suplementos alimentares e ingredientes funcionais, as proteínas de microalgas estão sendo exploradas em produtos como pães, barras de cereal, bebidas isotônicas entre outros. A demanda crescente por proteínas alternativas tem impulsionado o mercado de microalgas, com projeções de

crescimento significativo nos próximos anos. Contudo, desafios tecnológicos e econômicos ainda precisam ser superados para que a produção de proteínas de microalgas atinja uma competitividade comercial plena. A contínua inovação e investimentos em pesquisa são essenciais para a expansão desse mercado, visando atender à crescente demanda global por fontes de proteína sustentáveis e nutritivas (Severo *et al.*, 2024).

Devido ao seu alto valor nutricional, microalgas como *Spirulina* e *Chlorella* têm sido utilizadas na alimentação animal, melhorando a saúde, produtividade e qualidade de produtos em peixes, aves, suínos, gado e até animais de estimação, apesar dos desafios relacionados ao custo de produção. (Ansari *et al.*, 2021).

As microalgas representam uma promissora fonte de nutrientes para rações animais, oferecendo benefícios tanto nutricionais quanto ambientais. Seu uso crescente pode contribuir significativamente para a sustentabilidade da indústria de alimentação animal e para a saúde e produtividade dos animais. Embora os produtos à base de microalgas estejam tendo entrada gradativa no mercado de alimentos, ainda é difícil substituir os alimentos tradicionais. Ainda há muito a ser feito nas áreas de seleção de espécies de algas, cultivo de microalgas, desenvolvimento de alimentos funcionais e promoção dos produtos (Ansari *et al.*, 2021; Janssen, Wijffels e Barbosa, 2022).

2.6 SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS

Existem duas maneiras principais relacionadas ao cultivo de microalgas – (i) sistemas abertos e (ii) sistemas fechados. Os sistemas abertos, como lagoas e tanques, expõem as microalgas diretamente ao ambiente externo, enquanto os sistemas fechados, conhecidos como FBR, oferecem um ambiente controlado para o cultivo (Gupta *et al.*, 2015).

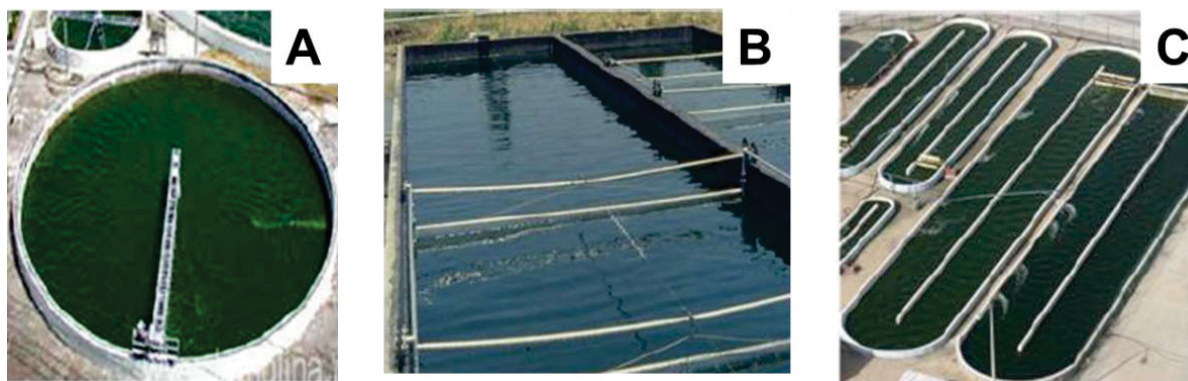
2.6.1 Sistemas abertos

Os sistemas abertos de cultivo de microalgas podem oferecer uma abordagem prática e econômica para a produção em larga escala, utilizando lagoas e tanques expostos ao ambiente para aperfeiçoar a captura de CO₂ e a conversão

em biomassa de valor agregado (Pina *et al.*, 2021). Os sistemas abertos podem ser lagos, lagoas ou tanques. Nos sistemas abertos, é difícil controlar a quantidade de intensidade da luz, que pode variar dependendo do horário local, também, difícil manter a temperatura (Park *et al.*, 2019). Por outro lado, os sistemas abertos têm custos operacionais mais baixos, especialmente considerando o consumo de energia, com reprodutibilidade mais fácil em escala comercial (Magalhães *et al.*, 2022a).

Na FIGURA 1, são apresentados modelos de sistemas abertos de cultivo de microalgas (lagoa circular, tanque aberto e lagoa tipo pista).

FIGURA 1 – SISTEMAS ABERTOS DE CULTIVO DE MICROALGAS



FONTE: Adaptado de Chen *et al.*, (2009).

LEGENDA: A- Lagoa circular; B-Tanque aberto; C- Lagoa tipo pista.

2.6.2 Sistemas fechados - fotobiorreatores

O termo “fechado” refere-se ao menor contato com o ambiente externo que estes sistemas apresentam em comparação aos sistemas abertos. Os sistemas fechados são comumente denominados FBR, e geralmente, são utilizados para cultivo de microalgas e produção de biomassa em larga escala, gerando produtos de alto valor comercial (Pina *et al.*, 2020). FBR consiste em sistemas fechados tubulares e expostos à luz solar, que utilizando uma área pequena, possui melhores condições para produção de biomassa (Scherer *et al.*, 2016).

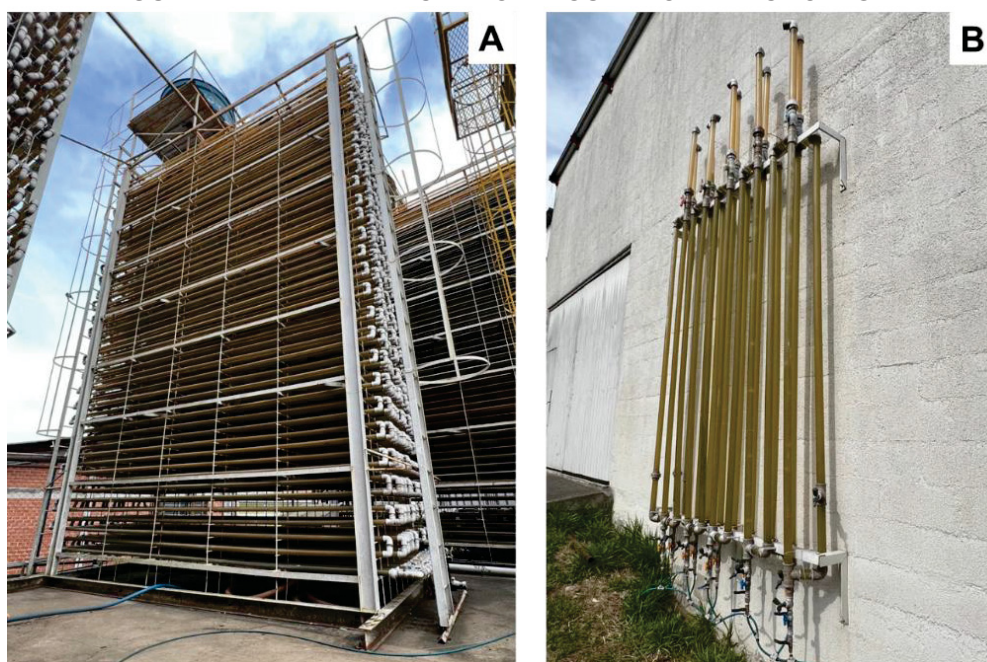
O cultivo em sistema fechado como FBR, permite controlar certas limitações, como maior controle das condições da cultura, redução do risco de contaminação por microrganismos indesejáveis, diminuição do consumo de água, apresenta elevada capacidade de fixação de CO₂, controle da intensidade da luz, controle da influência externa e da temperatura, embora o custo de operação e o custo de

fabricação sejam altos em comparação com os sistemas abertos. Em condições operacionais mais controladas, há menos perdas de CO₂ e maior produtividade do que os sistemas abertos, ou seja, a taxa de crescimento de microalgas no sistema fechado é 1,5 a 4 vezes maior do que nos sistemas abertos. A alta taxa de crescimento das microalgas tem um grande impacto na captura de CO₂ e pode levar a um aumento na produção de biomassa (Park *et al.*, 2019; Pina *et al.*, 2020; Magalhães *et al.*, 2022a).

Além disso, a comparação de sistemas abertos e fechados para a produção de microalgas tem sido amplamente revisada, destacando as vantagens técnicas, o rendimento de biomassa e a recuperação de nutrientes (Magalhães *et al.*, 2022a).

Na FIGURA 2, é apresentado um modelo de FBR de 12 m³ e o reator modelo *airlift* de 12 L para cultivo fechado de microalgas.

FIGURA 2 – SISTEMA FECHADO DE CULTIVO DE MICROALGAS



FONTE: A autora (2022).

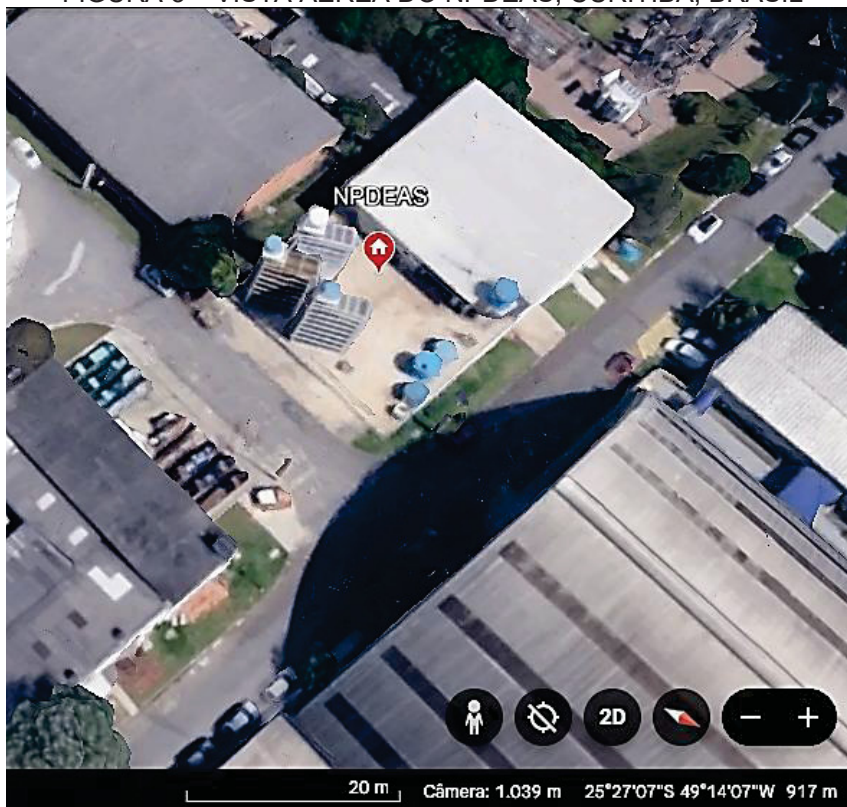
LEGENDA: A- FBR de 12 m³; B-modelo *airlift* 12 L.

2.7 CULTIVO DE MICROALGAS NO NPDEAS

O Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS), localizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba, apresentado na FIGURA 3, é um centro de pesquisa multidisciplinar focado no desenvolvimento de processos biotecnológicos com ênfase no cultivo de microalgas

em FBR em escala industrial. O NPDEAS possui FBR tubulares compactos em escala piloto e industrial (2 x 5 x 8 m), ocupando uma área de 12 m², (Galante, 2019; Santos *et al.*, 2021).

FIGURA 3 – VISTA AÉREA DO NPDEAS, CURITIBA, BRASIL



FONTE: Google Earth (2024).

Fundado com o objetivo inicial de alcançar a autossuficiência energética por meio da produção de biodiesel a partir de lipídeos microalgais, o NPDEAS vem expandindo suas atividades para incluir a produção de diversos bioprodutos de interesse comercial (Jacob-Furlan *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021).

O NPDEAS é conhecido por sua capacidade de realizar todas as etapas produtivas, desde o cultivo e manutenção de cepas de microalgas até o processamento e extração de compostos desejados. A produção começa em escala laboratorial e é gradualmente aumentada para uma escala piloto até atingir a escala industrial em FBR de grande volume. A biomassa microalgal é desidratada para a extração de metabólitos, e os resíduos dos cultivos são reaproveitados para a produção de biogás em um biodigestor (Jacob-Furlan *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021).

O NPDEAS realiza a incineração de resíduos provenientes da universidade para tratamento e geração de energia. O processo integra vários módulos de produção que abrangem diferentes processos, como a secagem da biomassa, processamento de biomassa residual produção de biodiesel e outros bioprodutos (como pigmentos, compósitos, ração animal e biomateriais) (Vargas *et al.*, 2014; Galante, 2019).

Essa abordagem de processos, permite o desenvolvimento de produtos para um amplo espectro de atividades no mercado, além de possibilitar a comercialização futura dos sistemas completos ou de forma separada conforme a demanda. Além das atividades de pesquisa e desenvolvimento, o NPDEAS se destaca por sua contribuição acadêmica, com publicações em revistas científicas de alto impacto, resultantes das pesquisas de alunos de graduação e pós-graduação de diferentes áreas do conhecimento (Vargas *et al.*, 2014; Galante, 2019; Jacob-Furlan *et al.*, 2021).

No APÊNDICE A é possível verificar o sistema de FBR e os processos desenvolvidos.

2.8 ESG PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A precisão na avaliação dos impactos ambientais é fundamental para a sustentabilidade e a transição para uma economia de baixo carbono, conforme exigido por investidores e pela sociedade. As empresas estão se adaptando aos desafios climáticos, concentrando-se nas oportunidades e nos riscos ambientais, o que demanda uma medição rigorosa dos riscos financeiros e de sustentabilidade em suas carteiras de investimento. As regulamentações ambientais têm como objetivo reduzir resíduos, emissões e a exploração de recursos naturais, promovendo o desenvolvimento sustentável. Tanto os governos quanto o setor privado estão comprometidos em cumprir essas metas, seja por iniciativa própria, pela demanda dos consumidores e investidores ou pela necessidade de reduzir custo (Sparacino *et al.*, 2021).

O termo em inglês *ESG* (*Environmental, Social and Governance*), corresponde a práticas ambientais, sociais e de governança de uma organização, e tem ganhado grande visibilidade devido a uma preocupação crescente do mercado

financeiro a respeito da sustentabilidade. Essas demandas ambientais, sociais e de governança são apresentadas como essenciais nas análises de riscos, colocando forte intimidação sobre o setor empresarial. Ademais, atuar de acordo com os padrões *ESG* amplia a competitividade no setor corporativo, além de ser essencial para a tomada de decisões de investidores (Pacto Global, 2022).

Os critérios *ESG* estão diretamente relacionados aos ODS, que são um apelo urgente a todos os países em uma parceria global que reúne grandes desafios e vulnerabilidades da sociedade como um todo, ao mesmo tempo que atua no combate as alterações climáticas e conservação ambiental. As empresas utilizam os critérios *ESG* para embasar suas estratégias e se posicionarem publicamente. Além disso, os princípios *ESG* são utilizados como medidas quantificáveis para avaliar o desempenho de empresas dentro dos três pilares – práticas ambientais, sociais e de governança (Nações Unidas Brasil, 2022).

O desenvolvimento sustentável é amplamente reconhecido como uma das estratégias mais importantes para reduzir o impacto ambiental nos mais diversos setores. Existem vários instrumentos e métodos para auxiliar na implementação do desenvolvimento sustentável (Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez, 2017).

A adoção de princípios *ESG* é fundamental para garantir a sustentabilidade de tecnologias emergentes (Perea-Moreno, Samerón-Manzano e Perea-Moreno, 2019), como o aproveitamento de resíduos florestais, que representa um avanço na economia circular, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e mitigando impactos ambientais relacionados às emissões de GEE (Pereira *et al.*, 2021). Esse processo não apenas contribui para a descarbonização da matriz energética, mas também favorece a economia circular ao transformar resíduos em insumos de valor agregado (Perea-Moreno, Samerón-Manzano e Perea-Moreno, 2019).

3 DESAFIOS E OBJETIVOS

3.1 DESAFIOS

Os RSU podem ser incinerados como forma alternativa aos métodos já realizados, como descarte em aterros sanitários ou incineração sem tratamento das emissões. O processo de incineração dos RSU, sem tratamento dos gases de exaustão, pode se tornar uma preocupação acerca da gestão de resíduos. Portanto, a recuperação energética desses resíduos florestais e a valorização da biomassa de microalgas cultivadas em FBR's industriais pode representar uma estratégia eficiente e robusta. Embora atualmente seja oneroso recuperar energia desses resíduos, essa prática oferece vantagens, como a redução do volume dos resíduos e diminuição de espaço físico em aterros e menores emissões de GEE.

Como produto da incineração, os gases são fixados pelas microalgas, envolvendo o processo de tratamento das emissões e, a partir da biomassa microalgal, a obtenção de bioprodutos de valor agregado, que podem ser direcionados a diferentes setores industriais. Dessa forma, a recuperação energética acoplada ao valor agregado da biomassa microalgal, pode tornar esse processo viável, pois as microalgas são capazes de utilizar o CO₂ proveniente da incineração de resíduos a seu favor e, assim, tratar as emissões que seriam liberadas diretamente à atmosfera.

3.2 OBJETIVOS

A transição para fontes de energia renováveis exige a exploração de recursos sustentáveis que possam maximizar a eficiência energética e minimizar impactos ambientais. Nesse contexto, a utilização de resíduos sólidos florestais e microalgas em sistemas combinados de incineração e FBR's industriais apresenta-se como uma abordagem promissora. Este estudo investiga a viabilidade de tais sistemas, buscando melhorias para o reaproveitamento energético de resíduos e avaliar os benefícios obtidos decorrentes do processo. Portanto, o objetivo geral do proposto trabalho é apresentado a seguir.

3.2.1 Objetivo geral

Analisar o potencial energético de resíduos sólidos florestais em sistema de incineração acoplado a FBR's industriais e o aproveitamento da biomassa de microalgas obtidas por meio do tratamento de emissões.

3.2.2 Objetivos específicos

- I) Caracterizar dos resíduos florestais provenientes de poda e manutenção da UFPR, por meio da análise química imediata, análise elementar, poder calorífico e Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Dispersão de Energia (MEV-EDS);
- II) Quantificar o processo de incineração dos resíduos florestais acoplado ao tratamento de emissões por microalgas produzidas em FBR's industriais, utilizando como indicadores a eficiência de biofixação de CO₂ e a produtividade de biomassa microalgal;
- III) Determinar as propriedades físico-químicas e energéticas da biomassa seca de microalgas produzida em FBR's industriais por meio da análise química imediata, composição elementar, poder calorífico e Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Dispersão de Energia (MEV-EDS);
- IV) Mensurar a atividade antioxidante e teor proteico da biomassa microalgal produzida em FBR's industriais, empregando o método DPPH e método Kjeldahl, respectivamente;
- V) Estimar o potencial de FBR's compactos tubulares em cultivo de microalgas para tratamento de emissões de RSO e recuperação energética com base em indicadores como a taxa de crescimento das microalgas, produtividade de biomassa e cálculos teóricos, estequiométricos e balanço de massa da biofixação de CO₂.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do proposto trabalho, estão sendo utilizadas como referência as atividades que vêm sendo desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do NPDEAS e sua infraestrutura localizada no Centro Politécnico da UFPR. A obtenção dos resíduos florestais para sua respectiva caracterização foi realizada a partir da poda e manutenção dos *campi* UFPR.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS FLORESTAIS PROVENIENTES DE PODA E MANUTENÇÃO DA UFPR

Para o estudo proposto, foram utilizados e caracterizados os resíduos florestais provenientes das podas e manutenção dos *campi* da UFPR. Os resíduos florestais são incinerados para produção de CO₂, que é direcionado aos FBR para absorção pelas microalgas e consequente biofixação.

4.1.1 Coleta dos resíduos florestais dos *campi* UFPR

Os resíduos florestais são descritos como material proveniente de atividades de manutenção, poda e/ou de limpeza pública da UFPR, como poda de folhas, galhos e árvores, varrição e material de jardinagem. A gestão dos RSU da UFPR, é realizada pela Superintendência de Infraestrutura (SUINFRA), que tem como objetivo garantir a manutenção e a conservação das edificações e instalações em todos os *campi* da UFPR.

Por meio de entrevistas realizadas separadamente com 2 colaboradores da SUINFRA, sendo um deles técnico-administrativo responsável pela gestão e outro responsável direto pela manutenção, foi possível reunir informações sobre a descrição do processo de coleta de resíduos realizado na UFPR.

Para que seja realizada a manutenção, a coleta dos rejeitos vegetais e armazenamento dos resíduos, são utilizados 2 carros elétricos (*ZoomCar*), conforme apresentado na FIGURA 5, e um trator da marca *Tobata*.

FIGURA 4 – CARRO ELÉTRICO ZOOMCAR PARA COLETA DE RESÍDUOS



FONTE: A autora (2022).

A demanda por coleta de resíduos na UFPR exige coletas diárias. Devido a essa frequência, não é possível estimar a quantidade exata de resíduos coletados em kg por dia. Inicialmente, os resíduos vegetais são separados de outros materiais que não são caracterizados como vegetais ou florestais. Além dos resíduos provenientes do Centro Politécnico, o terreno também armazena materiais coletados nos campi Reitoria, Batel e Saúde (centro). Após a coleta, os resíduos vegetais são levados a um terreno dentro do campus Centro Politécnico, localizado ao lado de uma das entradas do campus (acesso via Rua Amoroso Costa – Portão 1). Esse terreno é compartilhado com um estacionamento do *campus*, uma horta mantida pelos funcionários da manutenção SUINFRA, e uma parte da área é destinada ao armazenamento ou empilhamento dos resíduos.

Após serem levados ao terreno de descarte, os resíduos permanecem para decomposição natural. Quando a pilha de rejeitos é considerada muito volumosa, proporcionalmente ao espaço físico disponível, os funcionários da manutenção, utilizam um triturador para reduzir o volume dos resíduos e espalhar o material triturado para sua posterior incorporação ao solo, conforme mostrado na FIGURA 6.

FIGURA 5 – VISÃO GERAL DO LOCAL DE DEPÓSITO DOS RESÍDUOS NO CENTRO POLITÉCNICO (UFPR)



FONTE: A autora (2023).

De acordo com informações obtidas a partir de coleta de dados obtidos a partir de entrevistas realizadas com colaboradores da manutenção, a necessidade de trituração ocorre, em média, 2 vezes ao ano, e caso o volume ainda permaneça elevado, os resíduos são transportados por um caminhão até a Fazenda Experimental Canguiri da UFPR, que fica localizada em Pinhais – PR.

Além das entrevistas realizadas para o entendimento da gestão dos resíduos na UFPR, foi realizado um questionário que está disponível no **ANEXO G** deste documento.

4.1.2 Coleta das amostras de resíduos florestais para realização das análises

Com a finalidade de determinar o potencial de geração de energia a partir dos resíduos florestais da UFPR, por meio da coleta, análise química imediata (AQI), teor de umidade e Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Dispersão de Energia (MEV-EDS). Após a coleta da UFPR e armazenamento apresentados anteriormente, foram realizadas 3 coletas de amostras para realização das análises: **(i)** 15 amostras de troncos; **(ii)** somente galhos, somente folhas e

galhos com folhas; e (iii) 3 Lotes (sendo de uma mistura de troncos + galhos + folhas), conforme descrito a seguir:

- (i) Coleta de 15 amostras de troncos para realização da análise química imediata (AQI) e teor de umidade:

As 15 amostras de troncos foram coletadas com a finalidade de caracterização dos resíduos florestais. A coleta foi realizada de acordo com adaptação da norma proposta pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) 10007:2004, que consiste em retirar as amostras das pilhas ou montes de resíduos de pelo menos três seções (do topo, do meio e da base do monte ou pilha de resíduos).

As 15 amostras de troncos foram obtidas diretamente do local exato onde foram originalmente depositados pela UFPR. Esse processo envolveu a extração de 5 amostras dos três segmentos da pilha (topo, meio e base), totalizando 15 amostras de troncos. Na FIGURA 7 é apresentada a pilha de onde foram retiradas as amostras.

FIGURA 6 – PILHA DE TRONCOS AMOSTRADOS



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A- topo; B- meio; C- base.

Após essa coleta, as amostras foram misturadas, transformadas em corpos de prova em forma de disco e, posteriormente, submetidas a um processamento adicional de moagem utilizando um moinho de martelos, com ajustes feitos para garantir a conformidade com as especificações da norma ABNT NBR 14660 (2004), que estabelece diretrizes para a amostragem e preparação da madeira para análise;

- (ii) Coleta de galhos, folhas e galhos com folhas para realização da AQI e teor de umidade:

Essa coleta foi realizada no mesmo dia da coleta de troncos (i). Porém, foram coletados separadamente os seguintes componentes: (i) galhos; (ii) folhas; e (iii) galhos com folhas, conforme apresentado na FIGURA 8.

FIGURA 7 – COMPARTIMENTOS DE RESÍDUOS COLETADOS SEPARADAMENTE



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A- galhos triturados; B- folhas; C- galhos com folhas.

- (iii) Coleta de três lotes (troncos, galhos e folhas): para realização da AQI, análise elementar, MEV-EDS:

Foi realizada uma coleta em triplicata com o objetivo de obter um material composto, ou seja, um *blend* contendo troncos, galhos e folhas. Dessa maneira, foram coletados 3 lotes, com a delimitação de uma área de 1 m². Para essa coleta, todos os componentes de resíduos (galhos, troncos e folhas) foram pesados conforme mostrado na FIGURA 9.

FIGURA 8 – COLETA INDIVIDUAL DOS TRÊS LOTES DE RESÍDUOS



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A- Delimitação da área para formar a pilha de resíduos; B- Troncos, galhos e folhas coletadas; C- Componentes (troncos, galhos e folhas) separados e pesados.

Posteriormente, as amostras foram direcionadas ao laboratório da Energia da Biomassa (UFPR) para caracterização do material. Para essa caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos, foram preparados 3 *blends*, de acordo com a proporção de troncos, galhos e folhas de cada um dos lotes.

4.1.3 Análise físico-química dos resíduos florestais

A caracterização físico-química dos resíduos, é de extrema relevância para a estimativa de poder calorífico (PC), avaliação do processo de aproveitamento energético, apresentar dados sobre a estrutura e composição, além de permitir observar mudanças na composição e microestrutura de materiais antes e depois de reações químicas ou tratamentos térmicos.

Com a finalidade de compreender a composição química dos resíduos florestais, avaliar sua qualidade e potencial de aplicação, no trabalho aqui proposto foram realizadas as seguintes análises: **(i)** teor de umidade; **(ii)** análise química imediata de: a) 15 amostras de troncos; b) galhos, folhas; galhos com folhas; e c) três *blends*; **(iii)** análise química elementar dos três *blends*; e **(iv)** MEV-EDS para os três *blends*.

- (i) Teor de umidade:** O teor de umidade das amostras foi determinado conforme a norma ABNT NBR 14929/2017 na qual o material é seco em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante. A equação (1), descreve o cálculo de umidade:

$$Umidade = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Em que:

m_i = massa inicial da amostra (g);

m_f = massa final da amostra após a secagem (g).

Essa equação expressa a umidade como a porcentagem da perda de massa em relação à massa inicial da amostra.

(ii) Análise química imediata: A análise imediata define o teor de carbono fixo (CF), teor de material volátil (MV) e teor de cinzas (CZ) que foram realizadas de acordo com a norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D1762-84.

O teor de CF é o valor restante da massa após a liberação dos compostos voláteis, o qual é encontrado a partir da retirada dos valores das cinzas e teores de umidade.

A equação (2), descreve o cálculo de CF:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (2)$$

Em que:

CF= teor de carbono fixo (%);

CZ= teor de cinzas (%);

MV= teor de materiais voláteis (%).

Para a definição de MV, aproximadamente 1 g de amostra previamente seca foi pesada em cadinho previamente tarado e levado à mufla a uma temperatura de 600 ± 10 °C, por 7 minutos. Posteriormente, é retirado da mufla e colocado em um dessecador para ser mensurada sua massa final. Que é determinada pela equação (3):

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

MV= teor de materiais voláteis (%);

m_2 = massa inicial do cadinho + amostra do resíduo (g);

m_3 = massa final do cadinho + amostra do resíduo (g);

m = massa da amostra do resíduo (g).

Para analisar o teor de cinzas, cerca de 1 g da amostra, com baixa umidade, é pesada em um cadinho previamente pesado e levada à mufla a 600 ± 10 °C até que ocorra a queima total do material. Em seguida, retira-se a amostra da mufla, a qual passará pelo resfriamento em um dessecador até alcançar a temperatura

ambiente. Por fim, é realizada a quantificação da massa final utilizando a equação (4):

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que:

CZ = teor de cinza (%);

m_0 = massa do cadinho (g);

m_1 = massa do cadinho + amostra do resíduo (g);

m = massa da amostra (g).

(iii) Poder calorífico superior e inferior: O poder calorífico superior foi determinado usando a bomba calorimétrica *IKA C-5000*, de acordo com as diretrizes da *International Organization for Standardization* - ISO 18125-17. O poder calorífico inferior foi calculado a partir da utilização de dados do teor de hidrogênio obtidos na análise elementar, conforme a norma ISO 18125/2017.

(iv) Análise química elementar: A análise química elementar dos resíduos define os elementos que fazem parte da composição química do combustível, sendo estes, carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e oxigênio (O), que é determinado pela diferença dos demais elementos. Esta composição representa uma informação essencial para o processo de combustão (Schirmer *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2019). Essas análises foram realizadas em um analisador elementar (CHN-O) *Perkin Elmer 2400 series ii*.

(v) Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS): Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à EDS, é uma técnica utilizada para a caracterização e análise detalhada de materiais em nível microscópico. Essa técnica tem as finalidades de: permitir a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes na superfície de uma amostra com alta precisão. Esta análise é crucial para determinar a composição elementar de materiais. A combinação MEV-EDS pode mapear a distribuição dos elementos em uma amostra, fornecendo informações sobre a homogeneidade ou heterogeneidade do material que está sendo analisado (Mahajan *et al.*, 2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DO PROCESSO DE INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS ACOPLADO A TRATAMENTO DE EMISSÕES POR MICROALGAS CULTIVADAS EM FOTOBIORREATORES INDUSTRIAIS

4.2.1 Sistema de incineração de resíduos florestais

O NPDEAS detém de um incinerador *RGL 200 S*, desenvolvido pela Luftech Soluções Ambientais Ltda., o qual é um equipamento avançado, sendo projetado para a incineração de resíduos orgânicos oxidáveis. Este incinerador é composto por diversas câmaras e sistemas que garantem combustão, minimizando as emissões de gases nocivos e atuando na redução do volume de resíduos.

O sistema de incineração do Incinerador *RGL 200 S* inclui 7 componentes principais:

(i) Reator de gaseificação e combustão combinados, que integra os processos de gaseificação e combustão. O material a ser incinerado passa por uma série de fases que incluem secagem, decomposição e gaseificação. Os gases combustíveis gerados são então queimados em câmaras subsequentes;

(ii) Câmara de alimentação, localizada na parte superior do incinerador, é revestida internamente com placas de isolamento térmica. Possui uma tampa externa hermeticamente fechada e acionada pneumáticamente para impedir a liberação de gases durante o abastecimento. O abastecimento dos resíduos é feito manualmente em bateladas;

(iii) Câmara intermediária, revestida de material refratário e isolante, onde ocorre o aquecimento inicial e a secagem do material a ser incinerado;

(iv) Câmara de gaseificação, também revestida internamente com material isolante e refratário. O calor gerado pela câmara de combustão aquece, decompõe e gaseifica o material orgânico;

(v) Câmara de combustão é onde ocorre a queima dos gases gerados. Esta câmara possui uma grelha de aço que permite a passagem dos gases e um termopar para monitorar a temperatura de combustão;

(vi) Os gases oriundos do mix entram tangencialmente na câmara de pós-combustão, uma câmara cilíndrica revestida internamente por uma camada isolante

e outra refratária. Esta câmara promove a queima completa dos gases gerados no reator, garantindo a destruição de compostos orgânicos nocivos;

(vii) O sistema de tratamento de gases é composto por uma câmara expansora, um trocador de calor gás-ar, um ciclone de alta eficiência e um sistema de filtragem. Este sistema purifica os gases gerados, removendo material particulado e reduzindo os teores de SO_x, NO_x e outros compostos.

A redução de volume dos resíduos incinerados pode chegar a até 99 %, dependendo do tipo de resíduo. Para resíduos hospitalares, por exemplo, a redução de massa varia de 95 % a 98 %. A eficiência de destruição e remoção da matéria orgânica é de 99% a 99,9 %, o que é 10 vezes superior ao exigido pelas normas correspondentes. O rendimento energético do reator é de 90 %, com 10 % de energia perdida pela transferência de calor através das paredes do equipamento e pelas cinzas. A maior parte da energia gerada é direcionada para o sistema de tratamento dos gases.

As características técnicas do Incinerador *RGL 200 S*, são apresentadas na TABELA 6.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO INCINERADOR *RGL 200 S*

Características	RGL 200S
Capacidade Nominal – kg h ⁻¹	Até 30
Capacidade Térmica - kW*	Até 75
Vazão dos Gases - Nm ³ h ⁻¹	255
Volume de Cinzeiro – litros	44
Temp. Câmara de Alimentação - °C	70 a 100
Temp. Câmara de Combustão Primária - °C	300 a 700
Temp. Câmara de Pós - Combustão - °C	900 a 1200
Tempo Residência dos Gases nas Câmaras	2
Vazão dos Gases depois da Câmara de Pós-Combustão, a 1000°C – m ³ h ⁻¹	1200

FONTE: Adaptado de LUFTECH, 2023.

LEGENDA: *baseado em um poder calorífico inferior do resíduo de 2500 kcal kg⁻¹.

O tempo de permanência do resíduo no equipamento é de 60 a 100 minutos, passando pelas fases de secagem, aquecimento, decomposição, gaseificação, combustão primária e combustão secundária. A velocidade dos gases na saída da câmara de pós-combustão é de aproximadamente 4,5 m.s⁻¹. A temperatura da câmara de pós-combustão pode atingir até 1200 °C, operando numa faixa entre 900

°C e 1100 °C. Altas temperaturas não são recomendadas, pois aumentam o teor de óxidos nos gases provenientes da queima do resíduo.

Todas as informações técnicas supracitadas a respeito do incinerador, foram retiradas do manual do incinerador *RGL 200 S*, fornecido pela Luftech Soluções Ambientais Ltda (LUFTECH, 2023).

4.2.1.1 Produção de CO₂ pelo incinerador

De acordo com informações obtidas por Galante (2019), para que o sistema seja iniciado de maneira adequada, é necessário que haja um pré-aquecimento do equipamento com diesel na câmara de combustão principal. O bom fornecimento e distribuição de ar para combustão promoverá a queima dos resíduos, porém, o material que não vier a sofrer completa combustão, é armazenado abaixo da grelha, formando a maior parte (em torno de 80 %) das cinzas geradas.

Os gases de combustão seguem para a câmara de pós-combustão, onde completará a oxidação dos gases provenientes dos resíduos incinerados. Na câmara de pós-combustão pode haver também a utilização de diesel para garantir que a temperatura não fique abaixo de 900 °C, o que evita a liberação de dioxinas, sem a formação de N₂O. O objetivo do incinerador é proporcionar uma correta destinação aos RSU enquanto transfere a energia química deste material para os gases de combustão.

Os gases quentes provenientes do incinerador são direcionados a um conjunto de trocadores de calor, no qual ocorre aquecimento, evaporação e superaquecimento da água que servirá de fluido de trabalho para o ciclo Rankine de geração de potência. Além de promover a recuperação de energia dos gases quentes para a geração de potência, este conjunto de trocadores de calor permite que a temperatura dos gases de combustão seja suficientemente reduzida a 40 °C para serem inseridos nos FBR via coluna de biofixação (Galante 2019). Na FIGURA 10 é apresentado o incinerador utilizado.

FIGURA 9 – INCINERADOR NO PÁTIO DO NPDEAS

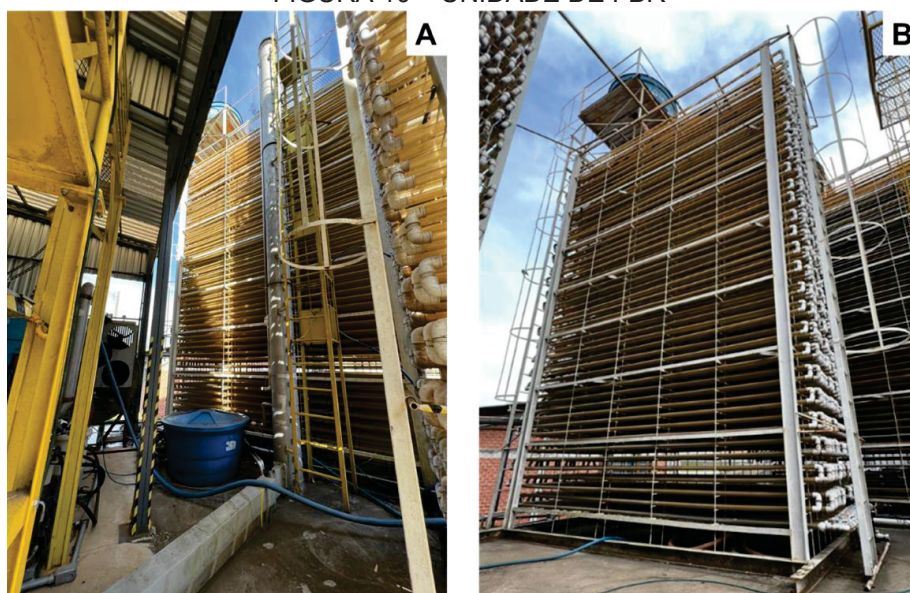


FONTE: A autora (2022).

4.2.1.2 Sistema de tratamento de emissões - Fotobiorreatores

Após a incineração dos resíduos e processo anteriormente descrito, o CO_2 é disponibilizado para a produção das microalgas sem compromete-las por aquecimento. Com a finalidade de reduzir a massa de cinzas nos gases de combustão, antes do FBR, é instalado o ciclone. Posteriormente ao ciclone, tem-se o FBR, que é responsável pela produção das microalgas com auxílio dos gases de combustão ricos em CO_2 e dejetos diluídos em água como meio de cultura. O conjunto de FBR aqui representado é composto por 5 unidades com capacidade para 10.000 L de meio de cultivo (Galante, 2019). Na FIGURA 11, é apresentada uma das unidades de FBR's disponível no pátio do NPDEAS.

FIGURA 10 – UNIDADE DE FBR



FONTE: A autora (2022).

LEGENDA: A- coluna de fixação (CO₂ – microalgas); B- Unidade de FBR.

4.2.1.3 Meios de cultivo

O cultivo é iniciado em escala laboratorial, com a preparação de 0,9 a 1,8 litros de meio CHU, que são esterilizados por calor úmido em replicata. Esses procedimentos são realizados em um ambiente esterilizado. A inoculação é feita com 10 % do volume de um cultivo saturado, no início da fase de declínio celular, o que é essencial devido ao estado metabólico focado no crescimento e ao maior número de células por volume alcançável. Os cultivos são mantidos sob aeração filtrada constante em um regime de dia/noite a 21 °C em um ambiente controlado. A evaporação diária de água é compensada com água deionizada e autoclavada, em ambiente estéril. Medidas de absorvância e contagem celular são realizadas diariamente (Jacob-Furlan *et al.*, 2022). Os componentes do meio CHU encontram-se descritos na TABELA 7.

TABELA 7 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MEIO SINTÉTICO CHU

Componentes	Concentração final (g.L ⁻¹)
Nitrato de sódio	0,25
Cloreto de cálcio di-hidratado	0,025
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	0,075
Fosfato de potássio dibásico	0,075
Fosfato de potássio monobásico	0,175

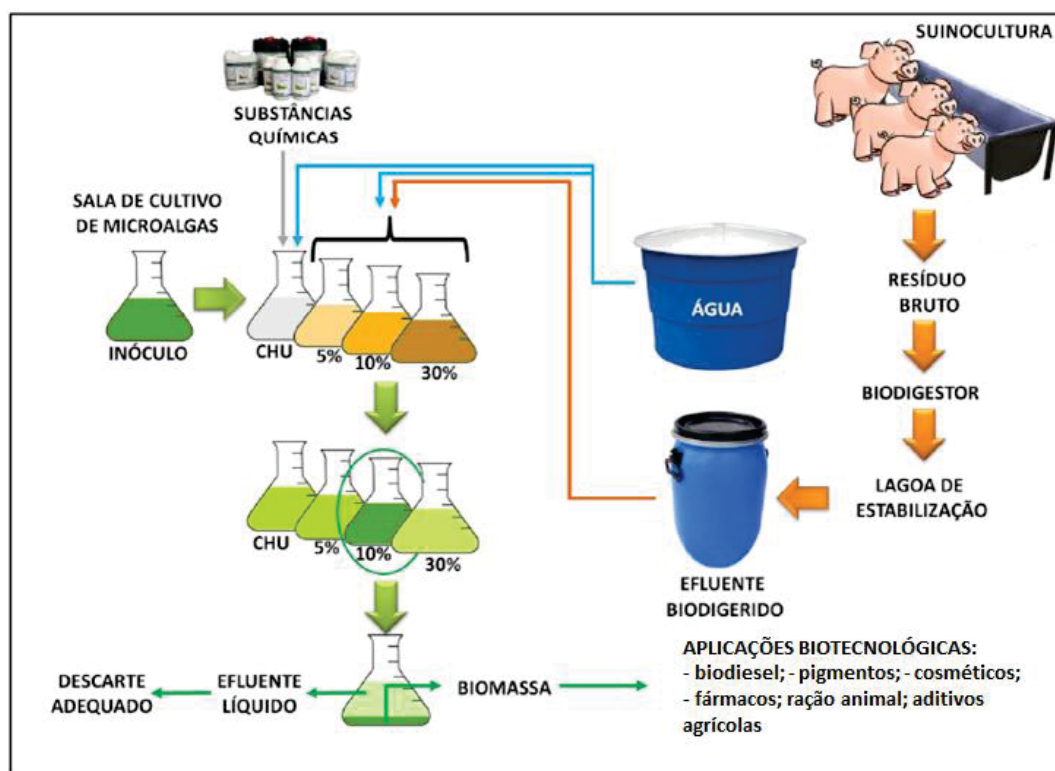
Cloreto de sódio	0,025
EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético)	0,05
Triplex III/EDTA	0,05
Hidróxido de potássio	0,031
Sulfato ferroso hepta-hidratado	0,00498
Ácido bórico	0,01142
Sulfato de zinco hepta-hidratado	$8,82 \cdot 10^{-6}$
Cloreto de manganês tetra-hidratado	$1,44 \cdot 10^{-6}$
Molibdato de sódio	$1,19 \cdot 10^{-6}$
Sulfato de cobre penta-hidratado	$1,57 \cdot 10^{-6}$
Nitrato de cobalto hexa-hidratado	$0,49 \cdot 10^{-6}$

FONTE: CHU (1942).

O dejetos suíno é um dos resíduos agroindustriais considerados mais poluentes atualmente no mundo e, se não processados de maneira adequada, as altas concentrações de matéria orgânica, (fósforo e nitrogênio), podem causar inúmeros problemas ambientais, como a eutrofização de rios e corpos hídricos, contaminação de solos e mananciais subterrâneos, volatilização de amônia e degradação de solos férteis (Taher, 2013).

A utilização de dejetos proveniente de suinocultura, é utilizado como nutriente alternativo ao meio de cultivo sintético no cultivo de microalgas. Na FIGURA 12, são apresentadas as atividades realizadas em escala laboratorial para avaliação da melhor proporção de efluente e diluição no que se refere à produção de microalgas.

FIGURA 11 – PRODUÇÃO LABORATORIAL DE NUTRIENTES DA SUINOCULTURA



FONTE: Adaptado de Taher (2013).

Com base nos experimentos de Taher (2013), são utilizados 40 L de dejetos suíno, coletados do biodigestor e acondicionados em freezer em garrafas de 500 mL. As amostras são acondicionadas por um período médio de 3 meses. Propôs-se três diluições do dejetos em água (5 %, 10 % e 30 %). O efluente suíno bruto foi então submetido à análise de cargas de fosfato, nitrato, nitrito, nitrogênio total, nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal para posterior avaliação do grau de biorremediação. A escolha das diluições foi baseada em experimentos prévios no laboratório do NPDEAS, que levaram em consideração a turbidez do meio e as quantidades de fosfato e nitrogênio total em comparação ao meio sintético CHU, considerando que diluições do dejetos biodigerido acima de 30 % não resultaram em crescimento de microalgas.

Os melhores resultados foram obtidos em cultivo em reator *airlift* na diluição de 10 %, com concentração final de células igual a $5199 \pm 458 \times 10^4 \text{ cél.mL}^{-1}$, e produção efetiva de biomassa de $1,44 \pm 0,04 \text{ g L}^{-1}$. Esses resultados são 70 % e 40 % superiores, quando comparados ao meio de cultivo sintético CHU, usado como controle (Taher, 2013).

Assim, o uso de dejetos no cultivo de microalgas contribui para a resolução de problemas ambientais, transformando rejeitos em insumos nutritivos para a produção de bioprodutos (Taher, 2013).

4.2.1.4 Processamento da biomassa

De acordo com os experimentos de Scherer (2016), após a produção, a biomassa de microalgas deve ser separada do meio de cultura para seu eventual aproveitamento. É necessário que seja retirada a água intercelular para extração eficiente dos compostos de interesse. As principais técnicas aplicadas na colheita das microalgas incluem floculação, centrifugação, secagem térmica em estufa e extração de compostos bioativos.

A floculação é iniciada com a adição de um floculante a fim de concentrar as microalgas. A biomassa obtida durante os cultivos foi transferida para a unidade de floculação com um tempo de residência e uma fonte e agitação que se deu por meio de um agitador mecânico com velocidade de rotação a cada 1 m³ no início e de 3355 rpm, durante 20 minutos, para garantir a homogeneidade da solução. Em seguida, a velocidade é reduzida para 173 rpm por 1 hora e 40 minutos com a finalidade de garantir o contato entre as partículas, aglomeração e sedimentação. O líquido clarificado é retirado com o auxílio de mangueiras, o qual é retornado para o meio de cultivo. O espessado ao fundo, é posteriormente enviado para a centrifugação e, por fim, direcionado para secagem da biomassa em estufa (Scherer, 2016).

Para a separação mecânica e retirada do excesso de líquido da biomassa microalgal, é realizado o processo de centrifugação. Para isso, é utilizada uma centrífuga da Marca *US Centrifuge System M512* com rotações de 3000 rpm com velocidade de centrifugação de 4 L min⁻¹., concentrando 1 m³ de cultivo, em 5 horas, com sistema de carregamento do tipo contínuo. O material oriundo da centrifugação resulta em uma pasta com teor de umidade de 80 % (Scherer, 2016). Na FIGURA 13 é apresentada a centrífuga utilizada no processo. Na FIGURA 14, é apresentado o aspecto da biomassa úmida durante e ao final da etapa de centrifugação.

FIGURA 12 – CENTRÍFUGA *US CENTRIFUGE SYSTEM M512*

FONTE: A autora (2022).

FIGURA 13 – ASPECTO DA BIOMASSA DE MICROALGAS

FONTE: Scherer *et al.*, (2016).

Após os processos de floculação e centrifugação, a biomassa microalgal é submetida à secagem térmica (desidratação), para que seja realizada uma eventual extração dos bioinsumos de interesse. A secagem da biomassa é realizada em estufa (Desidratador Pardal), com ar corrente a 60 °C, por 48 horas, por batelada de secagem de 20 kg de biomassa úmida, dividida em 5 bandejas. Na FIGURA 15, é apresentado o desidratador da marca Pardal, com a disposição das bandejas em que a biomassa é distribuída (Scherer, 2016).

FIGURA 14 – ESTUFA PARA SECAGEM TÉRMICA DA BIOMASSA



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 15 – ASPECTO DA BIOMASSA MICROALGAL DURANTE E APÓS A SECAGEM TÉRMICA



FONTE: Scherer *et al.*, (2016).

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA DE MICROALGAS CULTIVADA NOS FOTOBIOREATORES INDUSTRIAIS

Para a caracterização físico-química da biomassa seca de microalgas, foram realizadas as análises: Análise Química Imediata; Poder Calorífico; Análise Química Elemental; Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a Espectroscopia de Dispersão por Energia; Avaliação antioxidante pelo método DPPH; e Determinação do teor de proteínas pelo método Kjeldahl.

Para essa caracterização, foram utilizadas as seguintes amostras de biomassa microalgal, classificadas como brutas e residuais em diferentes meios de cultivo e períodos de obtenção:

(i) biomassa microalgal bruta seca cultivada em dejetos suíno (2018); (ii) biomassa microalgal residual seca cultivada em dejetos suíno (2018); (iii) biomassa microalgal bruta seca cultivada em dejetos suíno (2023); (iv) biomassa microalgal residual seca cultivada em dejetos suíno (2023); (v) biomassa microalgal bruta seca cultivada em meio sintético CHU (2023); e (vi) biomassa microalgal residual seca cultivada em meio sintético CHU (2023).

É importante destacar que as amostras denominadas "bruta" correspondem à biomassa contendo sua fração lipídica intacta, enquanto as amostras classificadas como "residual" referem-se ao material remanescente após a extração dos lipídios. Essas amostras foram obtidas a partir dos estudos conduzidos por Costa (2018) e Costa (2023), e as análises foram realizadas no Laboratório de Energia e Biomassa da UFPR.

4.3.1 Análise química imediata e poder calorífico da biomassa microalgal bruta e residual

Análise química imediata define o teor de carbono fixo, teor de material volátil (MV) e teor de cinzas (CZ), que foram realizadas de acordo com a norma ASTM D1762-84. O poder calorífico superior foi determinado usando a bomba calorimétrica *IKA C-5000*, de acordo com as diretrizes da ISO 18125-17. O poder calorífico inferior foi calculado a partir da utilização de dados do teor de hidrogênio obtidos na literatura, conforme a norma ISO 18125/2017.

4.3.2 Análise elementar da biomassa seca microalgal

A análise elementar da biomassa microalgal permite a identificação dos elementos que compõem sua estrutura química, especificamente carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e oxigênio (O), sendo este último determinado pela diferença entre os demais elementos. Essa caracterização fornece informações fundamentais para a compreensão do comportamento do combustível no processo de combustão (Schirmer *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2019). As análises foram realizadas utilizando um analisador elementar *Perkin Elmer 2400 Series ii* CHN-O.

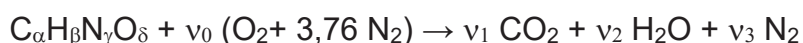
4.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) das biomassas brutas e residuais

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-SU5000) foi realizada para avaliar a microestrutura das 6 amostras de biomassa de microalgas. A análise de Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Elétrons (EDS) foi conduzida para examinar a microestrutura e a composição química das biomassas de microalgas.

4.4 FIXAÇÃO DE CO₂ EM FBR

A metodologia adotada para os cálculos teóricos, estequiométricos e balanço de massa seguiu as abordagens descritas por Rendeiro *et al.* (2008) e Turns (2011), adaptadas às especificidades dos resíduos florestais e biomassa de microalgas utilizados neste estudo.

Inicialmente, determinou-se a composição elementar média (C, H, O, N) dos *blends* de resíduos florestais e da biomassa seca de microalgas cultivadas em dois meios distintos (meio CHU e efluente suíno biodigerido). Esses dados permitiram estabelecer as fórmulas empíricas correspondentes. Com base nessas fórmulas empíricas, realizou-se o cálculo estequiométrico da combustão completa dos *blends* de resíduos florestais, considerando a reação geral abaixo:



Em que os índices α , β , γ e δ , são o número de mols de cada elemento presente no combustível.

Por meio dos índices, é possível obter os coeficientes dos produtos:

$$C: \alpha = v_1$$

$$H: \beta = 2v_2$$

$$O: \delta + 2 v_0 = 2 v_1 + v_2$$

$$N: \gamma + 2 (3,76) v_0 = 2 v_3$$

Sendo assim, para cada mol de O_2 presente no ar, existem 3,76 mols de nitrogênio (em que a composição do ar atmosférico consiste em 20,9 % de O_2 e 79,1 % de N_2). A abordagem adotada para os cálculos estequiométricos de combustão foi realizada com base nos seguintes trabalhos compilados na literatura: Loo e Koppejan, 2008; Rendeiro *et al.* (2008); Turns (2011); Carvalho Jr. e McQuay, (2007); McAllister; Chen; Fernandez-Pello (2011).

Para estimar a produtividade de biomassa microalgal, dados experimentais preliminares de cultivo obtidos por Taher (2013) foram escalonados de um sistema *airlift* laboratorial (12 L) e, posteriormente, para um sistema industrial de FBR com capacidade de 12 m^3 , mantendo proporcionalidade linear dos parâmetros produtivos.

Finalmente, a relação entre o CO_2 gerado pela combustão dos resíduos e o CO_2 biofixado pelas microalgas foi determinada por meio dos cálculos estequiométricos, relacionando o número de mols de carbono presente em cada um dos 3 *blends* de resíduos florestais com a quantidade correspondente de mols de CO_2 biofixados pelas microalgas durante o cultivo, respeitando as fórmulas empíricas obtidas para cada biomassa microalgal estudada.

Todos os cálculos foram considerados em condições ideais (100 % de conversão), servindo como base para estimativas do potencial de escalonamento da tecnologia proposta.

4.5 AVALIAÇÃO ANTIOXIDANTE DE BIOMASSA MICROALGAL SECA

Da mesma forma, para a avaliação antioxidante, as amostras utilizadas foram obtidas de trabalhos anteriores de Costa (2018) e Costa (2023), conforme descrito anteriormente. Para avaliar a atividade antioxidante da biomassa microalgal, foi utilizado o método do radical livre 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), adaptado do trabalho de Huang *et al.* (2022), que é amplamente empregado em ensaios de atividade antioxidante de amostras de plantas. As principais etapas dessa metodologia adaptada são descritas a seguir.

4.5.1 Obtenção das amostras

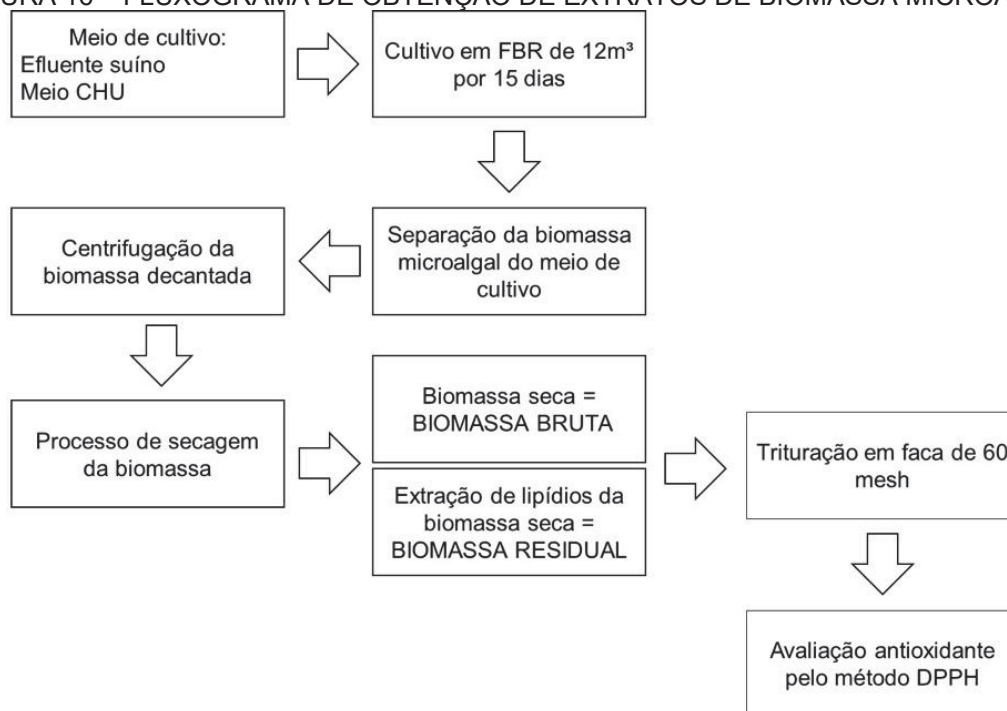
A biomassa seca de microalgas foi obtida de processos realizados pelo grupo de pesquisa NPDEAS. Mais especificamente, as amostras de biomassa seca usadas para a caracterização do potencial antioxidante neste trabalho foram derivadas dos estudos de Costa (2018) e Costa (2023). As microalgas foram cultivadas usando efluentes de suínos digeridos como meio de cultura.

A espécie *Tetrademus obliquus* foi cultivada em FBRs compactos com um volume de 12 m³ por 15 dias. As culturas foram então transferidas dos FBRs para tanques de floculação. Um floculante (*Tanfloc SG*) foi usado para separar a biomassa microalgal do meio de cultura. O pH das culturas foi ajustado para 7 (um valor dentro da faixa efetiva do floculante) com a adição de CO₂ industrial. Depois de adicionar o floculante, os tanques de floculação foram agitados por 15 minutos e deixados em repouso durante a noite para permitir a separação completa da biomassa. Posteriormente, a biomassa decantada foi submetida à centrifugação (*US Centrifuge System M512*) a 3000 rpm e velocidade de centrifugação de 4 L min⁻¹.

Após a centrifugação, a pasta de microalgas foi distribuída uniformemente em uma bandeja para o processo de secagem. Foram empregados vários métodos de secagem (secagem ao ar livre, secagem a baixa pressão, secagem por spray, secagem em tambor, liofilização, secagem em leito fluidizado ou secagem em fornos com temperatura controlada).

A metodologia de extração foi realizada com solventes orgânicos, e a separação dos compostos lipídicos foi feita por destilação. A preparação das amostras brutas secas (fração lipídica) e residuais (após a extração de lipídios) começou com a moagem em um moinho de facas para obter um pó fino (60 mesh) de biomassa microalgal, conforme apresentado na FIGURA 17.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DE OBTENÇÃO DE EXTRATOS DE BIOMASSA MICROALGAL



FONTE: A autora (2024).

Após a moagem e a obtenção de um pó fino (60 mesh) adequado para a diluição subsequente em metanol, as amostras de biomassa seca foram identificadas e armazenadas em tubos Eppendorf de 2 mL. As amostras foram obtidas nas seguintes condições, de acordo com a TABELA 8.

TABELA 8 – DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DAS AMOSTRAS AVALIADAS

Amostra	Descrição da biomassa	Meio de cultivo	Período de obtenção
1	Biomassa microalgal seca – residual	dejeito suíno	2018
2	Biomassa microalgal seca – bruta – fração lipídica	dejeito suíno	2018
3	Biomassa microalgal seca – residual	dejeito suíno	2023
4	Biomassa microalgal seca – bruta – fração lipídica	dejeito suíno	2023
5	Biomassa microalgal seca – residual	CHU	2023
6	Biomassa microalgal seca – bruta – fração lipídica	CHU	2023
7	(óleo de destilação) – 1 mg mL em metanol	dejeito suíno	2018
8	Inóculo	CHU	2024

FONTE: A autora (2024).

Além da biomassa seca, foi avaliado o óleo de destilação obtido por meio do seguinte processo desenvolvido por Gomes (2018): Após a secagem da pasta de microalgas, a biomassa seca foi moída e colocada dentro do reator com os solventes (hexano- 70 % e etanol- 30 %). O controle de rotação foi programado para

500 rpm e o banho ultratermostatizado – para controle térmico, a 50°C, o reator possui um condensador que evita a evaporação do solvente, aumentando assim o rendimento final da extração.

O processo de destilação do óleo de microalgas envolve várias etapas para a purificação do óleo bruto. Primeiramente, o óleo bruto é misturado com etanol e hexano. Em seguida, o excesso de solvente que não foi removido pela rotaevaporação é eliminado, deixando a mistura em uma estufa a 70 °C, por 24 horas. Além disso, a sílica gel é utilizada como uma fonte adicional de purificação.

Este método permite a obtenção de um óleo de microalgas mais puro, adequado para diferentes aplicações. Dessa maneira, o óleo de destilação também foi submetido a análise antioxidante pelo método DPPH.

4.5.2 Análise antioxidante pelo método DPPH

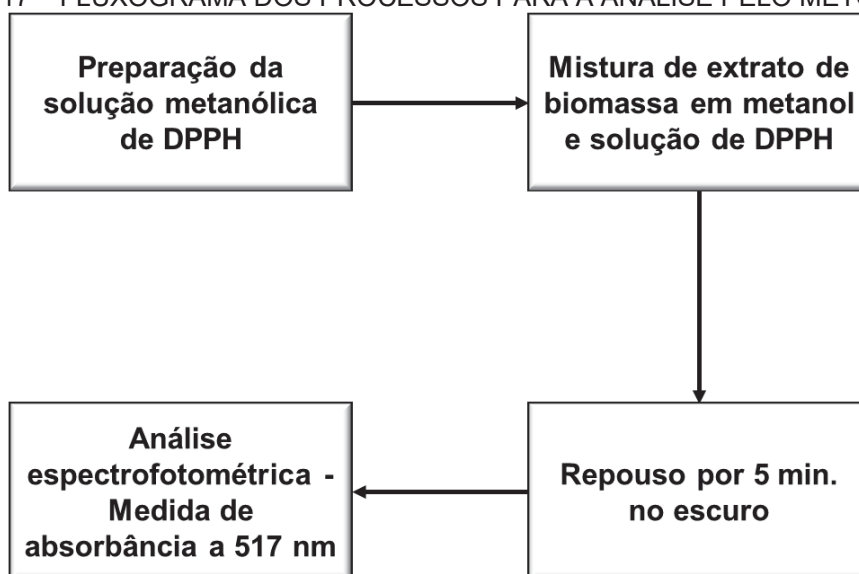
Após a preparação das amostras, as análises antioxidantes pelo método DPPH foram realizadas com base nos experimentos de Huang *et al.* (2022), conforme descrito a seguir.

Validação do método – Curva de calibração: Foram preparadas misturas de 3 mL de cinco soluções metanólicas de DPPH (Sigma Aldrich) e o controle positivo, ácido (+/-)-hidroxi-2,3,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico (Trolox) – um análogo solúvel em água da vitamina E (Sigma Aldrich). A concentração final de DPPH foi fixada em 0,02 mM, com concentrações variáveis de Trolox (0,0075, 0,01, 0,015, 0,02, 0,03 mM). As misturas foram agitadas para homogeneização e mantidas no escuro por 5 minutos. Após esse período, foi realizada uma análise espectrofotométrica, com leituras de absorbância feitas em um comprimento de onda de 517 nm. O experimento foi realizado em triplicata. A partir dos valores de absorbância e concentração, foi desenvolvida a curva padrão do método ($R^2 = 0,99$).

Ensaio de atividade antioxidante: 100 mg de seis amostras diferentes de resíduos de biomassa microalgal, e fracionada em estado sólido foram adicionados individualmente a 100 mL de metanol. As frações solúveis foram separadas por filtração, em que 0,2 mL de cada filtrado foi misturado com 2,8 mL de solução metanólica de DPPH, resultando em uma concentração final de DPPH de 0,02 mM. Além disso, foi preparada uma mistura da mesma concentração de DPPH com 0,2

mL de uma solução metanólica (1 mg mL) de óleo destilado oriundo da biomassa microalgal. As amostras foram agitadas para homogeneização e mantidas no escuro por 5 minutos. Após esse período, foi realizada uma análise espectrofotométrica, com leituras de absorvância feitas em um comprimento de onda de 517 nm. Qualquer diminuição na absorvância na presença de compostos com atividade antioxidante é expressa em equivalentes de Trolox, com base na curva de calibração descrita anteriormente, conforme apresentado na FIGURA 18.

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS PARA A ANÁLISE PELO MÉTODO DPPH



FONTE: A autora (2024).

4.6 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE PROTEÍNAS DE BIOMASSA MICROALGAL

Para a determinação do teor de proteínas, foram utilizadas as amostras obtidas de trabalhos prévios de Costa (2018) e Costa (2023), conforme descrito anteriormente. Primeiramente, foi realizada a determinação do teor de umidade das amostras e determinação do teor de proteínas pelo método Kjeldahl.

O método Kjeldahl é um dos procedimentos mais tradicionais para a determinação do nitrogênio total em matrizes orgânicas. A determinação de nitrogênio, proposto por Kjeldahl, é amplamente utilizado para análise de proteínas em diversas matrizes alimentares e biológicas. Dessa forma, esse método foi utilizado para avaliar o teor de proteínas da biomassa microalgal (Kjeldahl, 1883).

O método baseia-se na digestão da amostra com ácido sulfúrico concentrado, promovendo a conversão do nitrogênio orgânico em amônia, seguida de destilação e titulação. O método Kjeldahl, apesar de amplamente utilizado, não distingue o nitrogênio proteico do não proteico. Assim, a escolha do fator de conversão é fundamental para estimar com precisão o teor real de proteínas na biomassa estudada. O fator de conversão (k) utilizado nesse estudo foi baseado no trabalho de Templeton e Laurens (2015), no qual foi descrito um fator de conversão de 5,08 para espécies do gênero *Scenedesmus*. As principais etapas dessa metodologia adaptada são descritas a seguir.

4.6.1 Determinação do teor de umidade

A determinação da umidade nas amostras é fundamental antes da aplicação do método Kjeldahl para garantir a precisão na quantificação do teor de nitrogênio e, consequentemente, de proteínas. A umidade presente pode afetar a massa da amostra, levando a resultados imprecisos se não for considerada. Ao conhecer o conteúdo de umidade, é possível calcular o teor de nitrogênio com base na massa seca da amostra, permitindo comparações consistentes entre diferentes análises e laboratórios (Sáez-Plaza *et al.*, 2013; Cortés-Herrera *et al.*, 2021). A umidade das amostras foi determinada em um analisador de umidade *Miller Toledo HE53*.

4.6.2 Método Kjeldahl

A execução adequada do método Kjeldahl requer o uso de reagentes específicos em proporções precisas, que estão descritos a seguir.

Os reagentes necessários são: 10 mL ácido sulfúrico concentrado; 50 mL ácido sulfúrico 0,1N (com fator de correção); 40 mL hidróxido de sódio 50 %; 40 mL ácido bórico 4 %; 2,5 g de mistura catalítica (18 g de selenito de sódio, 20 g de sulfato de cobre, 242,5 g de sulfato de potássio); 0,5 mL indicador misto (0,132 g de vermelho de metila, 0,066 g de verde de bromocresol em 200 mL de álcool etílico).

O processo de digestão consiste em pesar 0,2 g da amostra sólida e transferi-la para um tubo de digestão. Adicionam-se 10 mL de ácido sulfúrico concentrado e 2,5 g da mistura catalítica, conforme apresentado na FIGURA 19.

FIGURA 18– PREPARAÇÃO DOS TUBOS DE DIGESTÃO



FONTE: A autora (2025).

A digestão foi realizada em *Digestor TE-152 – SCRUBBER*, no qual o tubo é posicionado na placa digestora e inicia-se o aquecimento a 100 °C. A temperatura é aumentada gradativamente em 50 °C a cada 10 minutos até atingir 350 °C ou até a solução adquirir coloração esverdeada. O digestor é desligado até o sistema resfriar (FIGURA 20).

FIGURA 19 – PROCESSO DE DIGESTÃO



FONTE: A autora (2025).

A etapa de destilação foi realizada utilizando-se um Destilador de Nitrogênio modelo TE-0364, o qual é mostrado na FIGURA 21. Para iniciar o processo, adicionou-se água destilada ao tubo contendo a amostra digerida, até que seu volume fosse duplicado. Em seguida, o tubo foi acoplado ao destilador, verificando-se o correto posicionamento dos encaixes. Posteriormente, foi adicionado hidróxido de sódio (NaOH) 50 % até que a solução adquirisse uma coloração escura, indicando alcalinização adequada para liberação da amônia. O aquecimento foi ajustado na posição 6 e, simultaneamente, foi acionado o sistema de refrigeração. A

amônia liberada durante o processo foi capturada em um Erlenmeyer contendo 40 mL de solução de ácido bórico a 4 % e 0,5 mL de indicador misto. A destilação foi mantida durante 10 minutos ou até que a solução no Erlenmeyer apresentasse uma coloração verde estável, indicando a captura completa da amônia.

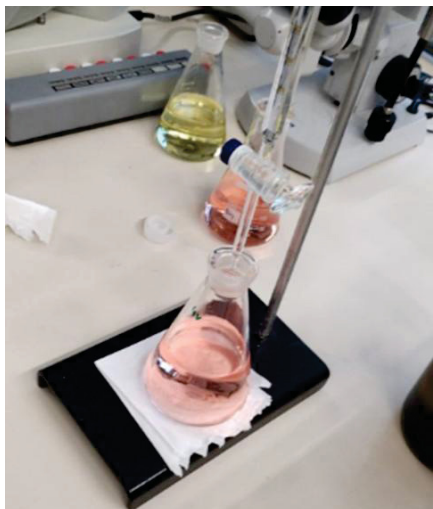
FIGURA 20 – PROCESSO DE DESTILAÇÃO



FONTE: A autora (2025).

A etapa de titulação foi iniciada com o preenchimento da bureta utilizando solução de ácido clorídrico (0,1N), previamente padronizada. O destilado obtido na etapa anterior foi titulado até que ocorresse a viragem de cor da solução, que passa do verde para rosa, indicando o ponto final da reação (FIGURA 22). O volume consumido de ácido clorídrico durante a titulação foi registrado para posterior cálculo do teor de nitrogênio total nas amostras analisadas.

FIGURA 21– PROCESSO DE TITULAÇÃO



FONTE: A autora (2025).

Para o cálculo do teor de proteína, primeiramente, calcula-se o teor de nitrogênio total (% N), com base no volume de ácido clorídrico padronizado consumido na titulação, utilizando a equação (5):

$$\%N = \frac{(V_{\text{titulação amostra}} - V_{\text{branco}}) \cdot [HCl] \cdot 14}{\text{massa seca amostra}} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

$V_{\text{titulação amostra}}$ em L;

V_{branco} em L;

[HCl] em mol L⁻¹;

14 em g mol⁻¹ do nitrogênio;

massa seca amostra.

A determinação do teor de proteínas foi realizada em duplicata para cada uma das seis amostras previamente descritas, que compreendem biomassa bruta e residual de microalgas cultivadas em dois diferentes meios (dejetos suíno e meio sintético CHU), em cultivos realizados nos anos de 2018 e 2023. O teor proteico foi estimado aplicando-se o fator específico de conversão de nitrogênio para proteína de 5,08, conforme recomendado por Templeton e Laurens (2015) para microalgas do gênero *Tetradismus* (sinônimo *Scenedesmus*). Esse cálculo foi efetuado

utilizando os valores obtidos de porcentagem de nitrogênio total determinados pelo método Kjeldahl e pela análise elementar (Dumas), conforme apresentado na equação (6):

$$\%Proteína = \%N.5,08 \quad (6)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste estudo são fruto da coleta e caracterização de resíduos provenientes das atividades de poda e manutenção arbórea realizadas no *campus* da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Foram incluídos na análise a biomassa de microalgas cultivadas e coletadas pelo NPDEAS. A caracterização desses materiais, tanto os resíduos lignocelulósicos quanto a biomassa de microalgas, é fundamental para a avaliação de seu potencial acerca de energias renováveis. Os esforços conjuntos visam a não apenas explorar novas fontes de biomassa para geração de energia, mas também contribuir para a sustentabilidade e gestão eficiente dos resíduos orgânicos produzidos na instituição.

5.1 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir refletem uma série de análises detalhadas realizadas com o objetivo de caracterizar e compreender as propriedades físico químicas das amostras dos resíduos florestais e biomassa de microalgas. As técnicas empregadas abrangem tanto aspectos químicos quanto estruturais, permitindo uma visão abrangente e precisa das amostras estudadas.

Os resultados contemplados neste estudo, são:

- (i) Questionário de entendimento da gestão de resíduos da UFPR;
- (ii) Análise Química Imediata e poder calorífico dos resíduos florestais;
- (iii) Análise Elementar dos três *blends* de resíduos florestais;
- (iv) Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) dos três *blends* de resíduos florestais;
- (v) Análise química imediata e poder calorífico das 6 amostras de biomassa seca de microalgas;
- (vi) Análise química elementar das 6 amostras de biomassa seca de microalgas;
- (vii) Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) das 6 amostras de biomassa seca de microalgas;
- (viii) Capacidade de fixação de CO₂ em FBR em escala de piloto;
- (ix) Avaliação Antioxidante pelo método DPPH para biomassa microalgal seca, óleo de destilação e inóculo obtidos do cultivo em FBR's a partir do processo de incineração dos resíduos florestais;

(x) Determinação do teor de proteínas pelo método de Kjeldahl e comparação pelo método Dumas (análise elementar).

Os dados obtidos a partir dessas análises fornecem uma base sólida para a compreensão das propriedades e potencialidades dos materiais investigados, auxiliando no desenvolvimento de aplicações específicas e na melhoria de processos industriais e tecnológicos.

A seguir, são apresentados os resultados detalhados de cada uma dessas análises, acerca das características das amostras estudadas.

5.1.1 Entendimento da gestão dos resíduos da UFPR

A gestão dos resíduos na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba é realizada de forma abrangente, abarcando diversos tipos de resíduos. Entre os principais resíduos geridos estão resíduos vegetais (podas), resíduos animais (biotério), resíduos comuns recicláveis, orgânicos e rejeitos, entre outros. A coleta desses resíduos é realizada considerando características físicas, químicas, biológicas, o grau de periculosidade e o estado físico dos mesmos.

A periodicidade da coleta varia de acordo com o tipo de resíduo, com alguns sendo coletados diariamente e outros conforme a demanda. Os resíduos são separados e destinados a diferentes locais conforme suas características e tipo. Por exemplo, resíduos recicláveis são geralmente destinados a associações de reciclagem ou prefeituras, enquanto resíduos de saúde, da construção civil e resíduos perigosos são destinados a empresas especializadas.

A UFPR demonstra um compromisso significativo com a gestão eficiente dos resíduos, refletindo uma abordagem responsável e estruturada para lidar com os desafios ambientais contemporâneos. No entanto, alguns desafios persistem, como a necessidade de assegurar que os resíduos não sejam misturados pelos coletores e a garantia da destinação correta dos resíduos.

5.1.2 Propriedades físico-químicas

Inicialmente, foi realizada uma avaliação de 15 amostras de troncos coletados para caracterização físico-química e energética, com o objetivo de serem utilizadas

como combustível sólido no processo de incineração e produção de gases de exaustão, visando à posterior biofixação de microalgas em FBR's.

Para essa análise, foram retiradas amostras da base, meio, e topo da pilha conforme norma adaptada ASTM D1762-84 (ASTM, 2013). A análise química imediata proporciona uma compreensão dos componentes como umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, e os resultados estão apresentados na TABELA 9. Cada parâmetro é expresso em porcentagem com seus respectivos valores médios e desvio padrão.

TABELA 9– ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA E UMIDADE DAS AMOSTRAS DE TRONCOS ANALISADAS

Amostra	CF (%)		MV (%)		CZ (%)		Umidade (%)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
1	23,47	± 0,21 a	76,10	± 0,16 g	0,43	± 0,06 e	15,40	± 0,26 ab
2	20,16	± 0,08 b	78,80	± 0,12 e	1,05	± 0,04 d	11,80	± 0,25 cde
3	17,87	± 0,25 cd	81,92	± 0,25 bc	0,21	± 0,00 f	12,45	± 0,40 cde
4	17,26	± 0,26 d	82,54	± 0,26 b	0,20	± 0,01 f	11,79	± 0,38 cde
5	18,18	± 0,07 c	80,50	± 0,10 d	1,32	± 0,06 b	12,82	± 0,26 cde
6	17,14	± 0,43 de	82,60	± 0,41 b	0,26	± 0,02 f	11,64	± 0,09 de
7	15,75	± 0,04 f	84,08	± 0,04 a	0,17	± 0,01 f	10,67	± 0,46 e
8	17,19	± 0,23 de	82,62	± 0,21 a	0,18	± 0,02 f	11,54	± 0,64 de
9	16,47	± 0,37 ef	83,40	± 0,40 a	0,14	± 0,04 f	11,26	± 0,89 e
10	17,31	± 0,21 d	81,48	± 0,24 c	1,21	± 0,04 bc	13,78	± 0,80 bcd
11	20,49	± 0,11 b	77,99	± 0,04 f	1,51	± 0,11 a	14,16	± 0,11 bc
12	20,15	± 0,39 b	78,68	± 0,35 ef	1,17	± 0,05 cd	13,96	± 0,81 bcd
13	20,14	± 0,29 b	78,72	± 0,29 e	1,14	± 0,01 cd	12,08	± 0,67 cde
14	19,90	± 0,15 b	78,90	± 0,15 e	1,20	± 0,02 bc	16,80	± 1,84 a
15	20,26	± 0,17 b	78,49	± 0,14 ef	1,26	± 0,03 bc	12,98	± 1,69 bcde

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: $\bar{x}$ = média; s = desvio padrão. Letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % utilizando o teste de Tukey. Os resultados da AQL estão expressos em base seca (bs).

O teste de Tukey é utilizado para comparar múltiplas médias e determinar se há diferenças significativas entre elas. As letras minúsculas em negrito ao lado dos valores indicam os resultados deste teste. As letras minúsculas ao lado dos valores indicam agrupamentos de médias que não diferem significativamente entre si ao nível de 5 % de significância. Amostras que compartilham a mesma letra (ou combinação de letras) não apresentam diferenças significativas. Amostras com letras diferentes são significativamente diferentes entre si. Por exemplo, a amostra 1 para CF: A amostra 1 “**a**” é significativamente diferente de todas as outras, já que

não compartilha nenhuma letra com as demais. As amostras 3, 4 e 6 compartilham a letra “d”, indicando que não há diferença significativa entre elas, mas elas são diferentes das Amostras 1 e 2.

Carbono fixo: Os valores de CF apresentados variam entre 15,75 % e 23,47 %. Esses valores indicam a quantidade de carbono não volátil presente na biomassa, ou seja, que permanece após a combustão. Diante desses valores obtidos, pode-se dizer que os valores de carbono fixo dessas amostras heterogêneas de troncos, estão dentro da faixa típica encontrada para resíduos agrícolas e madeiras, conforme relatado nos estudos de Vassilev *et al.* (2010) e para cultivares de tamareira (*Phoenix dactilyfera* L.) conforme relatado por Bousdira *et al.* (2014).

Materiais voláteis: Os valores de MV variam entre 76,10 % e 84,08 %. Os valores de MV são inversamente proporcionais aos valores de CF. Neste caso, a amostra 1, que possui o maior valor de CF 23,47 %), tem o menor valor de MV (76,10 %). Os valores determinados de MV, corroboram com a média descrita por Bousdira *et al.* (2014) para madeira, resíduos agrícolas e palha. Ademais, as amostras que apresentam os maiores valores de MV, indicam uma maior quantidade de substâncias que se transformam em gases durante a queima.

Cinzas: o teor de cinzas encontrado nessa análise variou entre 0,14 % e 1,51 %. Esses valores refletem a quantidade de material inorgânico restante da combustão completa da biomassa, sendo considerados importantes para entender a quantidade de material residual inorgânico que se acumula após a queima (Puri, Hu e Naterer, 2024).

A análise dos elementos presentes nas cinzas do material incinerado, pode ser de grande valia, pois há elementos presentes nas cinzas que podem resultar no encrustamento e corrosão de componentes do incinerador. Em geral, esses elementos incluem: titânio (Ti), fósforo (P), alumínio (Al), potássio (K), ferro (Fe), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) (Puri, Hu e Naterer, 2024).

A avaliação desses pesquisadores, no que diz respeito à análise de cinzas para resíduos florestais, indicam uma média de 1,78 % para cascas de *Pinus* e entre 0,23 % e 3,28 % para resíduos agrícolas e sólidos urbanos. As diferenças nos valores de cinzas podem ser atribuídas a vários fatores, como: tipo da biomassa, acondicionamento e tratamento e ainda qualidade do solo de onde foram obtidas.

Como as amostras analisadas tratam-se de troncos, porém, coletados de 3 seções da pilha de resíduos, pode-se atribuir essa diferença de valores à posição que o material estava disposto antes da coleta e, também, corrobora com a heterogeneidade das amostras, pois são provenientes de diversos *campi* da universidade e diversas espécies presentes nos *campi* da UFPR.

Umidade: A umidade representa a quantidade de água presente no material, sendo que a umidade influencia diretamente na eficiência da combustão da biomassa, uma vez que a água precisa ser evaporada antes da queima dos materiais voláteis e do carbono fixo (Soleh *et al.*, 2023). O teor de umidade encontrado nas amostras de troncos, avaliadas no proposto trabalho, variou entre 10,67 % e 16,80 %. Pode-se dizer que o valor encontrado nessa análise, foi baixo quando comparado com o estudo de Vassilev *et al.*, (2010), que relata valores entre 3 % e 63 % para diversas variedades de biomassa. Por outro lado, o teor de umidade analisado por Sette Jr. *et al.*, (2020) para subprodutos de espécies de *Eucalyptus* sp. Coletados na região central do Brasil foi de 12 %.

A variação de umidade é bastante grande e pode ser devida à variados fatores, como a intempéries climáticas, disposição de armazenamento e/ou tratamento dos materiais antes da queima. A umidade é uma variável que pode ser controlada, em que é possível tratar o material antes da incineração para que seja diminuída e, conseqüentemente, obter maior eficiência de queima (Lombardi, Carnevale e Corti, 2015).

Cada uma das variáveis analisadas, é crucial para determinar o comportamento do material durante a incineração e sua eficiência como combustível. Maiores valores de MV e baixos valores de cinzas são desejáveis para um combustível eficiente, pois indicam uma maior quantidade de material que se volatiliza e queima, deixando menos resíduos inorgânicos. A umidade deve ser baixa para evitar a perda de energia na evaporação da água (Lombardi, Carnevale e Corti, 2025). Vale a pena destacar que as análises estatísticas corroboram o caráter heterogêneo das amostras analisadas. Diversas espécies sendo descartadas no mesmo local e, mesmo assim, possuem características de uma biomassa eficiente para queima.

O poder calorífico é uma das características mais relevantes de um combustível, sendo definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa de biomassa. Existem dois tipos de

poder calorífico: o poder calorífico superior (PCS), que considera o calor latente de vaporização da água; e o poder calorífico inferior (PCI), que não inclui essa fração de energia (Lunguleasa *et al.*, 2020; Tsai *et al.*, 2020).

No PCI a pressão constante é comumente utilizada em cálculos de combustão, pois sua determinação auxilia na avaliação do potencial de geração e propagação de incêndios (Tsai *et al.*, 2020). O PCS é obtido diretamente por meio de testes em bomba calorimétrica, no qual os vapores d'água formados pela oxidação do hidrogênio são condensados e resfriados até a temperatura da bomba, liberando aproximadamente 600 kcal por quilograma de vapor d'água condensado. No entanto, em processos práticos de combustão, esses vapores geralmente escapam como vapor d'água nos gases de exaustão (Lunguleasa *et al.*, 2020).

As propriedades energéticas das amostras analisadas como PCS, PCI em base seca (bs) e PCI na umidade recebida (cr) estão apresentadas na TABELA 10.

TABELA 10 – RESULTADOS DO PODER CALORÍFICO PARA 15 AMOSTRAS DE TRONCOS

Amostras	PCS _{bs} (MJ kg ⁻¹)		PCI _{bs} (MJ kg ⁻¹)		PCI _{cr} (MJ kg ⁻¹)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
1	19,42	± 0,04 e	18,18	± 0,04 e	15,03	± 0,03 f
2	19,29	± 0,01 ef	18,06	± 0,01 ef	15,65	± 0,01 e
3	21,16	± 0,01 d	19,92	± 0,01 d	16,50	± 0,01 d
4	21,93	± 0,26 c	20,70	± 0,26 c	17,15	± 0,22 c
5	19,01	± 0,02 ef	17,77	± 0,02 ef	14,68	± 0,02 fg
6	21,27	± 0,01 d	20,03	± 0,01 d	16,59	± 0,01 d
7	23,68	± 0,00 a	22,44	± 0,00 a	18,63	± 0,00 a
8	22,52	± 0,36 b	21,28	± 0,36 b	17,65	± 0,30 b
9	22,63	± 0,07 b	21,40	± 0,07 b	17,75	± 0,06 b
10	18,79	± 0,29 f	17,55	± 0,29 f	14,49	± 0,25 g
11	19,06	± 0,02 ef	17,82	± 0,02 ef	14,72	± 0,02 fg
12	19,05	± 0,09 ef	17,82	± 0,09 ef	14,72	± 0,08 fg
13	19,45	± 0,00 e	18,21	± 0,00 e	15,05	± 0,00 f
14	19,45	± 0,06 e	18,22	± 0,06 e	15,05	± 0,05 f
15	19,37	± 0,03 e	18,13	± 0,03 e	14,98	± 0,03 f

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: $\bar{x}$ = desvio padrão; s = valor médio; **cr** = conforme recebido; **bs** = base seca. Letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % utilizando o teste de Tukey.

O **PCS** foi determinado em bomba calorimétrica e os resultados novamente apresentam características heterogêneas conforme observado pelo teste de Tukey.

O PCI (bs): foi calculado em função do PCS determinado e o teor de Hidrogênio utilizado foi de 6 %, valor comumente encontrado em biomassas lignocelulósicas (Cortez, Lora e Gomes, 2008).

O **PCI** (na base úmida, ou útil) foi calculado em função do teor de umidade presente nas amostras. Em outras palavras, é o valor calórico da biomassa considerado para o processo de combustão, ou seja, o calor que foi gerado em função daquela umidade no exato momento em que foi medido (Cortez, Lora e Gomes, 2008).

As médias do PCS e PCI (bs), variaram entre 18,79 MJ kg⁻¹ e 23,68 MJ kg⁻¹, e 17,55 MJ kg⁻¹ e 22,44 MJ kg⁻¹, respectivamente. Da mesma forma, conforme observada na AQL, essa análise energética corrobora com a heterogeneidade das amostras analisadas nessa primeira triagem.

O PCI (útil ou conforme recebido) neste estudo, varia entre 14,49 MJ kg⁻¹ e 18,63 MJ kg⁻¹. Dessa forma, esses valores indicam que o material pode ser um bom combustível sólido conforme estudos de Negi *et al.*, (2020) e Tsai *et al.*, (2020), que descrevem uma variação entre 16,5 MJ kg⁻¹ e 29,22 MJ kg⁻¹ para diferentes biomassas. Crisóstomo *et al.*, (2021) encontrou valores entre 16,57 MJ kg⁻¹ e 17,33 MJ kg⁻¹ para espécies de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. Dessa forma, os valores obtidos no presente estudo, estão dentro da faixa relatada na literatura como biomassa florestal com potencial utilização para fins energéticos.

Da mesma forma que as 15 amostras de troncos, outros compartimentos da biomassa, como galhos, folhas, e galhos com folhas também foram analisados. Os resultados dessa análise imediata estão dispostos na TABELA 11.

TABELA 11– ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA E UMIDADE DAS AMOSTRAS DE GALHOS, FOLHAS E GALHOS COM FOLHAS

Amostras	CF (%)		MV (%)		CZ (%)		Umidade (%)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Folhas	23,28	± 0,11 a	70,91	± 0,24 c	5,81	± 0,16 a	10,46	± 0,17 b
Galhos	21,06	± 0,19 b	76,48	± 0,18 a	2,46	± 0,02 c	11,01	± 0,43 ab
Galhos com Folhas	23,48	± 0,34 a	73,20	± 0,47 b	3,33	± 0,14 b	11,68	± 0,16 a

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: $\bar{x}$ = desvio padrão; s = valor médio. Letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % utilizando o teste de Tukey. Os resultados da AQL estão expressos na base seca.

Carbono fixo: O teor determinado para o CF, variou entre 21,06 % e 23,48 %, apresentando uma diferença estatisticamente significativa para os galhos.

No entanto, para as folhas e a combinação de folhas com galhos, a análise estatística não indicou diferença significativa. Esses resultados são comparáveis aos dados encontrados na literatura. Anggono *et al.* (2020) relataram um teor de CF de 17,70 % para folhas de *Pterocarpus indicus* (popularmente chamado de pau-rosa). Esse valor é notavelmente inferior ao encontrado em nosso estudo para as folhas, sugerindo possíveis variações entre espécies ou condições de amostragem. Em contraste, Ruiz *et al.*, (2021) relataram valores de CF para galhos de *Araucaria angustifolia* entre 22,42 % e 23,80 %, o que está em conformidade com os valores observados para os galhos no presente estudo. Essas comparações demonstram que, enquanto há uma variação entre espécies, os valores de CF para galhos obtidos em nossa pesquisa estão alinhados com os valores reportados na literatura, confirmando a consistência e a validade dos resultados obtidos, além de corroborarem com a heterogeneidade do material analisado.

Materiais voláteis: O teor determinado de MV para as amostras analisadas foi de 70,91 % para folhas, 76,48 % para galhos e 73,20 % para galhos com folhas (que ficou entre os valores de folhas e de galhos). Esses resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as três composições analisadas. Na literatura científica, diversos pesquisadores têm reportado valores semelhantes, corroborando com as análises realizadas.

Watzlawick *et al.*, (2020) determinaram o teor de MV em galhos e folhas de *Eucalyptus benthami*, encontrando um valor de 75,47 %, muito próximo dos valores obtidos em nosso estudo para os três compartimentos analisados. Anggono *et al.*, (2020) relataram um teor de MV de 74,62 % para folhas de *Pterocarpus indicus* (pau-rosa) também próximo ao valor encontrado para as folhas na presente pesquisa. Além disso, Ruiz *et al.*, (2021) descreveram valores de MV entre 74,77% e 76,64% para galhos de *Araucaria angustifolia* (pinheiro do Paraná), que estão em conformidade com os valores observados para os galhos no presente estudo. Esses valores relatados na literatura demonstram uma consistência com os dados aqui obtidos, confirmando a confiabilidade dos resultados.

Cinzas: O teor de cinzas determinado foi de 5,81 % para folhas, 2,46 % para galhos e 3,33 % para galhos com folhas, apresentando diferença estatisticamente significativa entre as três composições analisadas. Esses resultados foram comparados com dados da literatura para validar a consistência dos resultados obtidos. Ruiz *et al.*, (2021) descreveram valores de cinzas para galhos de *Araucaria*

angustifolia (pinheiro do Paraná), entre 0,95 % e 1,43 %, que são consideravelmente menores do que os valores que encontramos para os galhos e galhos com folhas.

No entanto, Habitzreiter *et al.* (2019), em um estudo com espécies tradicionalmente utilizadas como bioenergia, relataram teores médios de cinzas de aproximadamente 0,56 % para madeira e 2,93 % para galhos em espécies de *Eucalyptus*, valores que se aproximam mais dos nossos resultados para galhos com folhas.

Adicionalmente, Anggono *et al.* (2020) relataram um teor de cinzas de 7,68 % para folhas de *Pterocarpus indicus* (pau-rosa), um valor superior ao que foi encontrado para as folhas, mas que ainda está dentro de uma faixa plausível, considerando as variações entre espécies e condições de amostragem. Os valores de cinzas encontrados no presente estudo, embora variem entre as diferentes composições analisadas, estão dentro da faixa relatada na literatura. O conteúdo de cinzas deve ser considerado na operação do incinerador, mas, de maneira geral, os resultados são promissores para o uso desses resíduos como fonte de energia.

Umidade: O teor de umidade determinado para as amostras variou entre 10,46 % para folhas, 11,01 % para galhos e 11,68 % para galhos com folhas. Esses resultados indicam uma variação significativa no teor de umidade entre as diferentes composições analisadas.

Comparando com a literatura, Anggono *et al.* (2020) relataram um teor de umidade de 11,15 % para folhas de *Pterocarpus indicus* (pau-rosa), um valor bastante próximo ao encontrado no estudo ora realizado. Essa comparação sugere que os teores de umidade encontrados nas diferentes amostras analisadas estão alinhados com os dados relatados na literatura para outras espécies. A variação no teor de umidade entre folhas, galhos e galhos com folhas pode ser atribuída às diferentes características físicas e químicas dessas partes da planta, bem como às condições específicas de amostragem e armazenamento.

Dessa forma, os valores de umidade encontrados nessa análise, são considerados dentro da faixa e favoráveis para uma combustão eficiente.

As propriedades energéticas das amostras de galhos, folhas e galhos com folhas foram analisadas como PCS, PCI e PCI (na umidade recebida) estão apresentadas na TABELA 12.

TABELA 12– RESULTADOS DO PODER CALORÍFICO PARA AMOSTRAS DE GALHOS, FOLHAS E GALHOS COM FOLHAS

Amostras	PCS _{bs} (MJ kg ⁻¹)		PCI _{bs} (MJ kg ⁻¹)		PCI _{cr} (MJ kg ⁻¹)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Folhas	20,03	± 0,08 a	18,80	± 0,08 a	15,55	± 0,07 a
Galhos	18,63	± 0,02 b	17,39	± 0,02 b	14,36	± 0,02 b
Galhos com Folhas	19,59	± 0,24 a	18,35	± 0,24 a	15,17	± 0,21 a

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: $\bar{x}$ = desvio padrão; s = valor médio. Letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % utilizando o teste de Tukey.

Os resultados das propriedades energéticas indicaram que as amostras de folhas e galhos com folhas não apresentam diferença estatística significativa entre si. As amostras de galhos apresentaram valores um pouco menores quando comparado ao primeiro grupo de amostras (folhas e galhos com folhas).

Watzlawick *et al.*, (2020) relatam em seu estudo o PCS para galhos e folhas de *Eucalyptus benthami*. O valor encontrado foi de 19,80 MJ kg⁻¹, que está dentro da faixa encontrada para os compartimentos folhas e galhos com folhas deste trabalho. Também, é próximo ao valor encontrado por Anggono *et al.* (2020), ao analisar as folhas de *Pterocarpus indicus* (pau-rosa), encontrando o valor de 18,526 MJ kg⁻¹.

O estudo de Bousdira *et al.*, (2014) da mesma forma, avaliou um material também heterogêneo, subprodutos *Phoenix dactylifera* L. (tamareira), como: folhas, cachos secos, folhas secas e pecíolos, relatando uma média de PCS de 17 MJ kg⁻¹.

Estudos como o de Kataki e Konwer (2002), Kumar *et al.*, (2011) e Tsai *et al.*, (2020), avaliaram as propriedades de combustão de diferentes espécies de árvores, encontrando que o PCS de madeiras comuns usadas como lenha varia entre 18 MJ kg⁻¹ e 21 MJ kg⁻¹, que está de acordo com os resultados obtidos nas análises aqui realizadas. Esses estudos indicam que os valores de poder calorífico da biomassa analisada e desse trabalho são típicos para madeiras utilizadas como fonte de energia, reforçando a viabilidade do uso desses resíduos como um bom combustível sólido.

Após a análises das 15 amostras de troncos e amostras de compartimentos separadamente, sendo esses galhos, folhas e galhos com folhas, realizadas nessa primeira triagem, foi realizada nova coleta de três lotes, os quais foram caracterizados no que diz respeito a cada compartimento na pilha de resíduos, como (tronco, galhos e folhas).

Devido à heterogeneidade da composição dos componentes desses resíduos (galhos, troncos e folhas), na preparação das amostras foi respeitada as proporcionalidades dos diferentes resíduos, de forma a se obter uma única amostra composta representativa. Foram coletados 50 kg de cada lote:

- (i) O primeiro lote contemplou 24 kg de troncos, 22 kg de galhos e 4 kg de folhas, sendo este considerado o Lote 1 – Proporcionalmente, o material desse lote apresentou: 48 % de troncos, 44 % de galhos e 8 % de folhas;
- (ii) O segundo lote foi composto de 40 kg de troncos, 8 kg de galhos e 2 kg de folhas, denominado Lote 2. – Proporcionalmente: 80 % de troncos, 16 % de galhos e 4 % de folhas;
- (iii) Por fim, o terceiro lote dessa coleta, compreendeu 37 kg de troncos, 10 kg de galhos e 3 kg de folhas, o qual foi considerado Lote 3 – Proporcionalmente esse lote contemplou 74 % de troncos, 20 % de galhos e 6 % de folhas.

Os valores encontrados tanto nas cinzas quanto no poder calorífico inferior da amostra de folhas, são mais altos. Uma hipótese para essa diferença em comparação aos outros compartimentos, pode ser atribuída à tendência das folhas em acumular mais minerais e compostos inorgânicos durante o crescimento, resultando em um maior conteúdo de cinzas após a combustão (Mekonen *et al.*, 2024; Islam *et al.*, 2019).

Em relação ao poder calorífico inferior mais alto, isso pode ocorrer porque as folhas, apesar de terem um maior conteúdo de cinzas, também possuem compostos orgânicos que são altamente combustíveis. A presença de compostos voláteis e uma estrutura celular que facilita a combustão rápida e eficiente pode contribuir para um PCI elevado. De acordo com a literatura, a biomassa com alto teor de voláteis tende a ter um desempenho de combustão mais eficiente, compensando parcialmente o efeito negativo do alto conteúdo de cinzas (Mekonen *et al.*, 2024; Islam *et al.*, 2019).

Os valores elevados de cinzas e poder calorífico inferior nas amostras de folhas observados em seu estudo são consistentes com relatos da literatura científica.

Nessa segunda triagem, além das análises química imediata e de poder calorífico, foi realizada a análise elementar desses resíduos. Os resultados da análise elementar, estão dispostos na TABELA 13.

TABELA 13– RESULTADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS ANALISADAS

Amostra	C (%)		H (%)		N (%)		O (%)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Blend 1	48,79	± 0,04 a	6,35	± 0,21 a	0,56	± 0,06 b	44,30	± 0,18 b
Blend 2	46,10	± 0,08 c	5,96	± 0,21 a	0,79	± 0,04 a	47,14	± 0,25 a
Blend 3	47,27	± 0,22 b	5,99	± 0,24 a	0,32	± 0,01 c	46,42	± 0,01 a

FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: $\bar{x}$ = desvio padrão; s = valor médio. As letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5% utilizando o teste de Tukey. Os resultados foram expressos em base seca e livre de cinzas.

Esta técnica permite a determinação precisa da composição elementar dos materiais, incluindo a quantificação de elementos como carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio. A análise elementar é crucial para o entendimento das propriedades químicas fundamentais das amostras.

A análise elementar, fornece uma alta precisão dos resultados e uma compreensão detalhada acerca da composição de CHN-O de amostras de biomassa, permitindo a avaliação de seu potencial energético e impacto ambiental, por meio da avaliação dos gases liberados durante a combustão. Pois, cada elemento possui um papel significativo no processo de combustão e na qualidade das emissões resultantes do processo de combustão.

(i) Carbono: O teor de carbono é um dos indicadores mais importantes na avaliação de materiais combustíveis, pois o carbono é o principal responsável pela liberação de energia durante a combustão. A energia gerada na incineração de resíduos florestais é diretamente proporcional ao teor de carbono presente no material.

O *Blend 1*, foi a amostra que apresentou o maior teor de C, que foi de 48,79 %, esse valor é igual ao valor descrito para casca de *Eucalyptus* sp relatado por Vassilev *et al.* (2010). Esses autores fazem uma comparação de diversos materiais florestais e de madeira. Alguns dos valores descritos, são para resíduos de madeira foi de 51,4 %; para resíduos florestais 52,7 %; para casca de pinheiro 53,8%; para madeira em geral foi de 49,6 %; e para biomassa agrícola 49,9 %, dentre outras espécies e compartimentos analisados.

Os altos teores de carbono em todos os *blends* indicam que esses resíduos têm um bom potencial energético. O *Blend 1*, com o maior valor de carbono, pode ser considerado o mais eficiente em termos de energia gerada durante a incineração. O C apresenta normalmente um teor mais baixo na biomassa do que

nos combustíveis fósseis sólidos. O teor extremamente elevado de C é característico de algumas cascas de madeira e de resíduos de plástico, também apresentando elevado teor de cinzas. O teor de C é mais elevado na biomassa lenhosa do que na biomassa herbácea (Vassilev *et al.*, 2010).

(ii) Hidrogênio (H): O hidrogênio também contribui para a energia liberada durante a combustão. A presença de hidrogênio é favorável, pois influencia a eficiência térmica do processo. O hidrogênio é uma fonte vital de calor na combustão, no entanto, o hidrogênio adicional presente na biomassa reduz normalmente o teor de carbono (Negi *et al.*, 2020). Os valores de hidrogênio são estatisticamente semelhantes entre os 3 *Blends* analisados, indicando uma contribuição energética consistente. Os valores de hidrogênio descritos nos trabalhos de Vassilev *et al.* (2010), para casca de *Eucalyptus* sp. (5,7 %), resíduos de madeira (6,1 %), resíduos florestais (5,4 %), casca de pinheiro (5,9%), madeira em geral (6,1 %) e biomassa agrícola (6,2 %), estão dentro da faixa de valores e corroboram os resultados dos três *Blends* deste estudo, sendo estes 6,35 %, 5,96 % e 5,99 %, respectivamente.

(iii) Nitrogênio (N): O nitrogênio é o componente menos desejável nos resíduos combustíveis, pois pode contribuir para a formação de óxidos de nitrogênio (Nox) durante a combustão, que são poluentes atmosféricos. O Nox é liberado na atmosfera durante a combustão que ocorre em equipamentos de aquecimento (fornos, caldeiras, por exemplo) e em máquinas térmicas (turbinas a gás e motores). A redução do teor de N é benéfica para minimizar as emissões nocivas (Buruiana *et al.*, 2021).

O *Blend* 3, com 0,32 % apresenta o menor teor de nitrogênio entre as amostras avaliadas, sendo o mais vantajoso do ponto de vista ambiental, enquanto o *Blend* 2, com 0,79 %, apresenta o maior teor de N entre as amostras. Se utilizado como combustível para queima, pode gerar mais Nox e requerer maior controle adicional de emissões. Os resultados encontrados para N nesse estudo corroboram os valores descritos por Vassilev *et al.* (2010), que relatam os seguintes valores: 0,3 % para casca de *Eucalyptus* sp.; resíduos de madeira foi de 0,5 %; para resíduos florestais 0,7 %; para casca de pinheiro 0,3 %; para madeira em geral foi de 0,1%; e para biomassa agrícola 1,2 %. Dessa forma, constata-se que os valores apresentados por meio da análise dessas amostras, estão dentro dos padrões citados pela literatura.

(iv) Oxigênio (O): O oxigênio presente na composição dos resíduos é um indicador da quantidade de material oxidável. Embora o oxigênio seja essencial para a combustão, seu teor interno pode influenciar a densidade energética do material. O *Blend 2*, com 47,14 %, apresentando o maior teor de oxigênio, pode ter uma densidade energética ligeiramente menor, pois uma maior fração do material é composta de oxigênio, que não contribui diretamente para a liberação de energia na combustão. Entretanto, o *Blend 1*, apresenta o menor valor, 44,30 %.

Os resultados encontrados para oxigênio nesse estudo corroboram os valores descritos por Vassilev *et al.* (2010), que relatam os seguintes valores: 45,3 % para casca de *Eucaliptus* sp., resíduos de madeira foi de 51,4 %, para resíduos florestais 41,1 %, para casca de pinheiro 39,9 %, para madeira em geral foi de 44,1 % e para biomassa agrícola 42,6 % (Vassilev *et al.*, 2010; Bousdira *et al.*, 2014).

Em resumo, o *Blend 1* apresentou alto teor de carbono e hidrogênio, e um moderado teor de nitrogênio e oxigênio, apresentando ser o mais eficiente e equilibrado para incineração e fins energéticos. O *Blend 2* apresentou um bom potencial energético, porém seu alto teor de nitrogênio pode representar um desafio ambiental. Por fim, o *Blend 3* apresentou o menor teor de nitrogênio, é ambientalmente vantajoso, mas o teor de oxigênio sugere uma densidade energética ligeiramente inferior.

Os resultados das análises química imediata e poder calorífico para esses três *Blends* estão dispostos na TABELA 14, que fornece uma visão comparativa detalhada sobre as propriedades combustíveis dos três *blends* de amostras. Esses dados são cruciais para entender a eficiência energética e a adequação de cada um dos *blends* para diferentes aplicações industriais.

TABELA 14– RESULTADOS DA AQI E PODER CALORÍFICO PARA OS 3 *BLENDS* DE AMOSTRAS ANALISADOS

Amostra	MV (%)		CF (%)		CZ (%)		PCS (MJ kg ⁻¹)		PCI _{bs} (MJ kg ⁻¹)	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Blend 1	77,95	± 0,46a	20,14	± 0,33c	1,90	± 0,13b	19,59	± 0,14a	18,28	± 0,14a
Blend 2	76,37	± 0,55b	21,24	± 0,46b	2,39	± 0,09a	18,63	± 0,09b	17,39	± 0,09b
Blend 3	76,02	± 0,20b	22,45	± 0,06a	1,53	± 0,20a	18,96	± 0,19b	17,72	± 0,19b

FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: $\bar{x}$ = desvio padrão; s = valor médio. Letras minúsculas em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % utilizando o teste de Tukey. **Bs**: base seca.

Materiais voláteis: A maior quantidade de MV foi observada no *Blend 1* (77,95 %), enquanto o *Blend 3* apresentou a menor quantidade (76,02 %). O teor de MV é importante, pois influencia diretamente na combustibilidade do material.

Carbono fixo: O *Blend 3* teve o maior teor de CF (22,45 %), o que sugere uma maior estabilidade na combustão prolongada. Em contrapartida, o *Blend 1* apresentou o menor teor de CF (20,14 %).

Cinzas: O teor de cinzas foi mais alto no *Blend 2* (2,39 %) e mais baixo no *Blend 3* (1,53 %). Menores teores de cinzas são desejáveis, pois indicam menor resíduo inorgânico após a combustão. O teor de cinzas tem impacto adverso na combustão e subsequentemente reduz o valor calorífico dos componentes da biomassa lenhosa (Islam *et al.*, 2019).

Poder calorífico superior: O *Blend 1* apresentou o maior PCS (19,59 MJ kg⁻¹), o que indica uma maior energia liberada durante a combustão.

Poder calorífico inferior: Similar ao PCS, o PCI também foi maior no *Blend 1* (18,36 MJ kg⁻¹), sugerindo uma maior eficiência energética considerando as perdas.

Estudos como os de Katakai e Konwer (2002), Kumar *et al.*, (2011) e Islam *et al.*, (2019) avaliaram as propriedades de combustão de diferentes espécies de árvores, encontrando que o PCS de madeiras comuns, geralmente utilizadas como lenha, variam entre 18 MJ kg⁻¹, e 21 MJ kg⁻¹. Esses estudos mostram que os valores de poder calorífico da biomassa analisada neste trabalho que são típicos para madeiras utilizadas como fonte de energia, reforçando a viabilidade do uso dos resíduos avaliados como combustível alternativo e seu reaproveitamento energético.

A qualidade da biomassa depende das propriedades quantitativas, como poder calorífico, teor de umidade e cinzas. Embora muitos trabalhos deem mais ênfase ao poder calorífico inferior (base seca) do que ao poder calorífico superior, este não é considerado tão importante, devido à diferença existente entre as espécies (Islam *et al.*, 2019). Além disso, o poder calorífico efetivo, pode ser influenciado pelo teor de cinzas e teor de umidade no momento da queima. Ou seja, há a necessidade de avaliar a relação entre o teor de umidade do material a ser queimado e seu potencial de geração de energia útil para um sistema energético (Furtado *et al.*, 2012; Lunguleasa *et al.*, 2020).

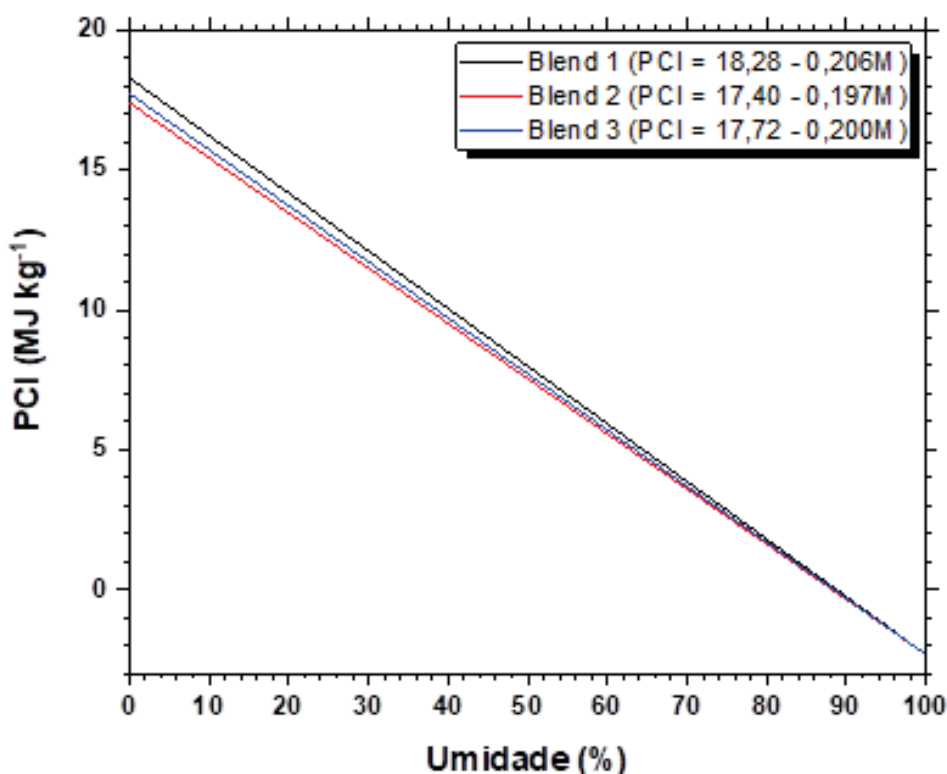
Para aprimorar o aproveitamento da biomassa como fonte de energia, o pré-tratamento térmico é frequentemente aplicado, uma vez que a biomassa pode apresentar, alto teor de umidade e elevada higroscopicidade, ou seja, capacidade de

reter umidade do ambiente podendo afetar a eficiência energética. Esta é uma propriedade relevante em estudos de bioenergia, pois biomassas com alta higroscopicidade podem necessitar de pré-tratamentos térmicos, como secagem ou torrefação, interferindo na qualidade combustível (Tsai *et al.*, 2020).

O gráfico apresentado na FIGURA 23 ilustra a relação entre o valor energético das biomassas analisadas e o teor de umidade. Cada linha no gráfico representa uma equação linear que descreve como o valor energético varia de acordo com a umidade do material. As equações indicam que o valor energético diminui linearmente com o aumento do teor de umidade. Essa relação inversa é evidenciada pelas inclinações negativas nas equações de regressão para cada *blend*.

Dessa forma, na FIGURA 23, é mostrada a relação teórica entre o Poder Calorífico Inferior (PCI) em MJ kg e a Umidade (%), para os três *blends* estudados, conforme descrito por Loo e Koppejan, (2008), p.12.

FIGURA 22 – RELAÇÃO TEÓRICA DO VALOR ENERGÉTICO EM FUNÇÃO DA UMIDADE



FONTE: A autora (2023).

LEGENDA: *Blend* 1 (linha preta): PCI=18,28-0,206M. *Blend* 2 (linha vermelha): PCI=17,40-0,197M. *Blend* 3 (linha azul): PCI=17,72-0,200M.

NOTA: o "M" expresso na equação é referente ao teor de umidade.

O teor de umidade dos combustíveis de biomassa varia consideravelmente, dependendo do tipo de biomassa e do armazenamento da biomassa (Loo e Koppejan, 2008). A presença de água na amostra ocasiona a redução do valor energético, pois parte do calor gerado é consumido na evaporação da água e aquecimento do vapor até a mesma temperatura dos demais gases. Além disso, variações do teor de umidade dificultam o controle da combustão (Bahadori *et al.*, 2014; Loo e Koppejan, 2008, p.12).

Assim, pode-se verificar que: *Blend 1* (linha preta): Representado pela equação de regressão $PCI=18,28-0,206M$, em que “M” é a umidade. A linha preta mostra que, à medida que a umidade aumenta, a eficiência energética diminui linearmente;

Blend 2 (linha vermelha): Representada pela equação de regressão $PCI=17,40-0,197M$. A linha vermelha também indica uma diminuição linear da eficiência energética com o aumento da umidade, mas com uma inclinação ligeiramente diferente em comparação com *Blend 1*;

Blend 3 (linha azul): Representada pela equação de regressão $PCI=17,72-0,200M$. A linha azul segue o mesmo padrão, mostrando essa tendência de diminuição linear da eficiência energética com o aumento da umidade.

Os três *blends* mostram uma diminuição linear da eficiência energética com o aumento da umidade. Isso ocorre porque a água presente na biomassa deve ser evaporada durante a combustão, o que consome parte da energia disponível, resultando em uma eficiência energética mais baixa.

O *Blend 1* possui maior eficiência energética com PCI inicial ($18,28 \text{ MJ kg}^{-1}$), a uma umidade de 0 %. Porém, sua taxa de declínio por umidade é ligeiramente maior que a das outras duas misturas. O *Blend 2* apresenta menor eficiência energética (com PCI inicial de $17,40 \text{ MJ kg}^{-1}$) e a menor taxa de declínio com o aumento da umidade. O *Blend 3* possui uma eficiência energética intermediária (PCI de $17,72 \text{ MJ kg}^{-1}$) e uma taxa de declínio similar à do *Blend 1*.

O limite de umidade até o qual a combustão é considerável é de aproximadamente 65 %. Acima desse valor a energia gerada pela combustão é insuficiente pela evaporação e aquecimento do vapor. De modo geral, a queima de biomassa com teores de umidade 50 a 55 % de umidade na base úmida, requer a suplementação com outros combustíveis (como gás natural ou óleo combustível). Além disso, a combustão será incompleta e, provavelmente, haverá aumento da

emissão de poluentes, dependendo da eficiência do queimador (Santos, Colodette e Queiroz, 2013).

O gráfico apresentado na FIGURA 23 ressalta a relevância do controle da umidade no combustível utilizado para a geração de energia. Manter a umidade baixa é crucial para maximizar a eficiência energética do combustível. Cada tipo de amostra reage de maneira ligeiramente diferente ao aumento da umidade, mas todas seguem a mesma tendência geral de redução linear da eficiência energética com o aumento da umidade.

5.1.3 Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Elétrons (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-SU5000) foi utilizada para estudar a microestrutura e composição química de 3 *blends* de resíduos florestais de biomassa.

As micrografias obtidas por MEV apresentam a microestrutura dos três blends de resíduos florestais de biomassa. Cada imagem, capturada com uma ampliação de 75x, permite uma análise detalhada da morfologia das partículas presentes em cada *blend*. As eletromicrografias referentes aos 3 blends de resíduos florestais analisados encontram-se no APÊNDICE B.

Na sequência, no APÊNDICE C são apresentadas as imagens de EDS em camadas da microestrutura das amostras dos *blends* de resíduos florestais dos *blends* 1, 2 e 3, respectivamente.

Na TABELA 15 são apresentados os elementos encontrados em cada um dos blends analisados e suas respectivas massas (%).

TABELA 15 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DOS BLENDS (EM % DE MASSA)

Amostra	C (%)	O (%)	Ca (%)	K (%)	Si (%)	S (%)	Cl (%)
Blend 1	61,6	37,3	0,7	0,3	0,1	-	-
Blend 2	58,2	39,5	1,7	0,5	-	0,1	-
Blend 3	60,3	39,0	0,4	0,2		0,1	0,1

FONTE: A autora (2024).

As biomassas apresentam variações em vários aspectos, como teor de umidade, composição química, teor de cinzas e presença de substâncias inorgânicas. Além disso, os elementos mais comuns, em ordem decrescente de abundância, incluem C (carbono), O (oxigênio), H (hidrogênio), N (nitrogênio), Ca

(cálcio), K (potássio), Si (silício), Mg (magnésio), Al (alumínio), S (enxofre), Fe (ferro), K (potássio), Cl (cloro), Na (sódio) e Mn (manganês) (Molino *et al.*, 2016).

Carbono e Oxigênio: a alta porcentagem de carbono e oxigênio é típica em biomassa florestal, pois esses elementos são os principais constituintes da celulose, hemicelulose e lignina. Essas macromoléculas são os componentes estruturais primários da biomassa vegetal. Estudos mostram que o carbono geralmente compõe cerca de 50-60% da biomassa seca, enquanto o oxigênio pode variar entre 30-40% (Mosule *et al.*, 2021; Titus *et al.*, 2021). O carbono constitui a estrutura principal dos compostos orgânicos. O papel das florestas no ciclo global do carbono é substancial, pois atuam como grandes sumidouros de carbono, armazenando e ciclando carbono dentro do ecossistema. Enquanto o oxigênio participa de diversos grupos funcionais e é parte da água, fundamental para a vida das plantas (Xuyang *et al.*, 2011). C e O são os elementos majoritários encontrados nas três amostras analisadas.

Cálcio: presente em menores quantidades, é um nutriente essencial para as plantas, envolvido na estrutura da parede celular e na regulação de vários processos fisiológicos. A quantidade de cálcio pode variar dependendo da espécie da planta e solo onde ela cresce. A presença de cálcio na biomassa é comum e pode influenciar a cinética de combustão e a formação de cinzas (Titus *et al.*, 2021).

Potássio: é um macronutriente importante para as plantas, desempenhando um papel crucial na fotossíntese, na regulação osmótica e na ativação de enzimas. Sua presença na biomassa é esperada, e ele também pode afetar a combustão e a formação de cinzas. Estudos indicam que o conteúdo de potássio na biomassa pode variar, mas geralmente está presente em quantidades menores em comparação com carbono e oxigênio (Titus *et al.*, 2021).

Silício: a presença de silício pode ser atribuída à absorção deste elemento pelo solo. O silício pode contribuir para a resistência mecânica das plantas e proteção contra pragas e doenças. Embora não seja essencial para todas as plantas, sua presença pode variar dependendo da espécie vegetal e das condições do solo. A literatura destaca que o silício ajuda na resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos (Schaller *et al.*, 2028; Li *et al.*, 2018).

Enxofre e Cloro: o enxofre é um componente de alguns aminoácidos e vitaminas, sendo essencial para o crescimento das plantas. O cloro, embora presente em quantidades muito pequenas, é necessário para o processo de fotossíntese. A presença desses elementos em baixas quantidades na biomassa é

comum e pode afetar a emissão de poluentes durante a combustão (Puri, Hu e Naterer, 2024; Li *et al.*, 2018).

Os elementos detectados nos três *Blends* analisados, são consistentes com os encontrados na literatura científica. A presença de altos teores de carbono e oxigênio é esperada devido à composição da biomassa vegetal. A variação nos teores de cálcio, potássio, silício, enxofre e cloro pode ser atribuída a fatores como a espécie de planta, o tipo de solo e as condições ambientais. Mais uma vez, corroborando a heterogeneidade das amostras analisadas.

5.1.4 Propriedades físico químicas da biomassa seca de microalgas

Magalhães *et al.* (2022b) desenvolveram equações preditivas para estimar o poder calorífico da biomassa de microalgas com base na análise química imediata e na análise elementar de diferentes espécies do gênero *Scenedesmus*. Os resultados obtidos por este autor indicam que as propriedades termoquímicas dessas microalgas são diretamente influenciadas pela composição de MV, CZ e CF, parâmetros essenciais para a avaliação de seu potencial como biocombustível. Na TABELA 16 são apresentados os valores reportados para espécies do mesmo gênero analisado no estudo, ou seja, *Tetradismus*, permitindo uma comparação detalhada entre os dados da literatura e os resultados obtidos nesta tese.

TABELA 16– RESULTADOS DE AQI, ANÁLISE ELEMENTAR E PCS (TEÓRICO) DE BIOMASSA DE MICROLAGAS DE ESPÉCIES DO GÊNERO *Scenedesmus*

Microalga	AQI (%)			ELEMENTAR (%)				PCS – teórico (MJ kg ⁻¹)
	MV	CZ	CF	C	H	O	N	
<i>Scenedesmus</i> sp.	75,33	7,30	12,78	50,00	7,11	30,70	7,25	14,24
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	51,45	17,33	31,13	52,60	6,21	31,92	8,75	19,00
<i>Scenedesmus</i> sp.	54,30	37,80	7,90	32,60	4,70	19,30	4,20	15,40
<i>Scenedesmus</i>	71,04	18,02	10,94	43,00	2,79	46,20	6,65	20,31

FONTE: Adaptado de Magalhães *et al.* (2022b).

Os valores demonstram uma variação significativa nas propriedades das biomassas analisadas, mesmo pertencendo ao mesmo gênero.

Os resultados de AQI, elementar e PC, obtidos na presente tese, são apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18, respectivamente, permitindo a comparação com os dados previamente reportados para espécies do gênero *Scenedesmus* (TABELA 16).

A análise química imediata da biomassa de *Tetradismus obliquus* revelou diferenças significativas nos teores de MV, CZ e CF entre as amostras provenientes de diferentes períodos e condições de cultivo. Os valores obtidos para MV variam entre 64,80 % e 72,44 %, enquanto os teores de CZ e CF variam de 6,75 % a 16,77 % e de 15,77 % a 21,23 %, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 17.

TABELA 17– ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DA BIOMASSA SECA DE MICROALGAS

Amostra	MV (%)		CZ (%)		CF (%)	
	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>
Bruta – dejetto – 2018	72,44	± 0,13 a	6,81	± 0,05 e	20,75	± 0,14 a
Residual – dejetto – 2018	72,02	± 0,23 a	6,75	± 0,23 e	21,23	± 0,05 a
Bruta – dejetto – 2023	71,69	± 0,33 a	9,25	± 0,36 d	19,06	± 0,12 b
Residual – dejetto – 2023	64,80	± 0,32 d	16,77	± 0,29 a	18,43	± 0,17 b
Bruta – CHU – 2023	67,52	± 0,55 c	15,80	± 0,28 b	16,67	± 0,27 c
Residual – CHU – 2023	69,15	± 1,01 b	15,08	± 0,23 c	15,77	± 0,81 c

FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: $\bar{x}$ = média; *s* = desvio padrão. Letras minúscula em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % usando o teste de Tukey. Os resultados são expressos em uma base seca.

Os resultados deste estudo estão alinhados com a literatura existente sobre biomassa seca de microalgas. Zakaria *et al.* (2022) relataram que a biomassa de *Spirulina* sp. apresentou 68,15 % de MV, 8,06 % de CZ e 12,57 % de CF.

Esse estudo demonstrou que o MV tem um impacto significativo no PCS, indicando que biomassa com MV superior tende a gerar maior energia (Magalhães *et al.* 2022b).

Em relação às aplicações energéticas, os resultados indicam menor presença de cinzas em comparação às amostras de 2023, o que é positivo, já que altos teores de cinzas podem reduzir a eficiência energética da biomassa. Por outro lado, o maior teor de carbono fixo observado neste estudo sugere maior estabilidade térmica e potencial energético, tornando a biomassa adequada para processos como combustão e pirólise (Racero-Galaraga *et al.*, 2024; Protić *et al.* 2021).

Na TABELA 18 encontram-se os resultados referentes à análise elementar realizada. Dado que a biomassa microalgal apresenta características químicas e físicas únicas, significativamente distintas de outros combustíveis, este estudo considera as propriedades específicas das microalgas, incluindo os teores de

carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N). O objetivo é viabilizar a aplicação da biomassa microalgal em diferentes rotas energéticas.

TABELA 18 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA BIOMASSA DE *Tetrademus obliquus*

Amostra	C (%)		H (%)		N (%)		O (%)	
	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>
Bruta – dejetto – 2018	48,90	± 0,24 a	7,32	± 0,14 b	7,18	± 0,02 bc	36,60	± 0,39 d
Residual – dejetto – 2018	47,11	± 0,02 b	7,13	± 0,01 b	7,12	± 0,02 c	38,65	± 0,05 c
Bruta – dejetto – 2023	48,35	± 0,12 a	7,33	± 0,12 b	7,21	± 0,05 bc	37,12	± 0,30 d
Residual – dejetto – 2023	45,98	± 0,20 c	7,85	± 0,08 a	7,56	± 0,12 a	38,62	± 0,40 c
Bruta – CHU – 2023	42,88	± 0,22 d	7,09	± 0,11 b	7,43	± 0,07 ab	42,59	± 0,40 b
Residual – CHU – 2023	40,74	± 0,00 e	7,26	± 0,01 b	6,81	± 0,02 d	45,19	± 0,03 a

FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: $\bar{x}$ = média; *s* = desvio padrão. Letras minúscula em negrito seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em um nível de significância de 5 % usando o teste de Tukey. Os resultados são expressos em base seca livre de cinzas.

A análise elementar mostrou variações relevantes na composição química conforme as condições de cultivo. As amostras de biomassa bruta apresentaram maior teor de carbono (C%), indicando maior potencial energético. O teor de hidrogênio (H%) aumentou nas amostras cultivadas em dejetto suíno (2023), favorecendo o poder calorífico, apesar do leve aumento no oxigênio (O%), que pode reduzir a densidade energética (Japar *et al.*, 2021).

Para as mesmas amostras foi determinado o PC. Os resultados referentes são demonstrados na TABELA 19.

TABELA 19 – ANÁLISE DO PODER CALORÍFICO EM AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS

Amostra	PCS _{bs} (MJ kg ⁻¹)		PCI _{bs} (MJ kg ⁻¹)	
	$\bar{x}$	<i>s</i>	$\bar{x}$	<i>s</i>
Bruta – dejetto – 2018	22,75	± 0,05 a	21,24	± 0,05 a
Residual – dejetto – 2018	22,56	± 0,02 a	21,09	± 0,02 a
Bruta – dejetto – 2023	20,38	± 0,08 b	18,87	± 0,08 b
Residual – dejetto – 2023	17,53	± 0,15 d	15,91	± 0,15 d
Bruta – CHU – 2023	18,37	± 0,09 c	16,87	± 0,09 c
Residual – CHU – 2023	18,32	± 0,05 c	16,86	± 0,05 c

FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: $\bar{x}$ = média; *s* = desvio padrão. **bs** = base seca. Letras minúsculas em negrito seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em uma significância de 5 % usando o teste de Tukey.

A análise do PC da biomassa de *Tetrademus obliquus* apresenta variações nos valores de PCS e PCI entre as amostras avaliadas. A biomassa proveniente de 2018 apresentou os maiores valores de PCS e PCI, que atingiram 22,75 MJ kg⁻¹ e 21,24 MJ kg⁻¹, respectivamente. Esses resultados indicam uma maior densidade energética em comparação às amostras de 2023, particularmente aquelas cultivadas em meio de cultura CHU.

A redução dos valores de PCS e PCI nas amostras de 2023 pode ser atribuída ao menor teor de carbono e hidrogênio e ao maior conteúdo de oxigênio, que são fatores conhecidos por diminuir o potencial energético da biomassa. Além disso, a distinção entre biomassa bruta e residual evidencia o impacto da extração lipídica sobre o conteúdo energético, sendo que a biomassa bruta apresentou valores consistentemente superiores, ainda que sem diferença estatisticamente significativa.

A análise do poder calorífico é fundamental para avaliar o potencial energético das microalgas, contribuindo para o planejamento e a viabilidade de sua utilização como fonte renovável de energia. Além disso, diante da crescente demanda por combustíveis sustentáveis e da relevância das microalgas como matéria-prima de terceira geração, este estudo representa uma contribuição significativa para o avanço científico e tecnológico no campo dos biocombustíveis (Magalhães *et al.*, 2022a).

No APÊNDICE D é apresentada as eletromicrografias das amostras de biomassa seca de microalgas com granulometria de 60 mesh, referentes aos pontos analisados.

No APÊNDICE E é possível observar as imagens de EDS em camadas da microestrutura das amostras de biomassa seca de microalgas analisadas. Embora se trate de uma análise semi-quantitativa os resultados obtidos corrobora os dados da análise elementar realizada.

5.1.5 Fixação de CO₂ em FBR

Uma questão muito importante no escalonamento de sistemas de produção de microalgas, consiste na dificuldade de manter altas produtividades de biomassa nos sistemas de larga escala por diversas razões, como alteração na geometria dos sistemas, sistema exposto a condições ambientais sem controle de temperatura e

com iluminação durante apenas o dia, dificuldades de circulação, redução da relação área iluminada e área no escuro, balanço de carbono e distância entre a parte iluminada e trocador de gases. Investigando a literatura, como discutido no tópico 2.4.1, os sistemas de escala industrial são menos produtivos comparados com sistemas laboratoriais.

Portanto, ao planejar plantas de produção de biomassa de microalgas, ou ainda, sistemas industriais de biofixação de emissões, é preciso avaliar a capacidade efetiva de fixação dos sistemas de FBR's, assim, pode ser viável dimensionar corretamente o volume e tamanho dos reatores em função da quantidade de emissão a ser tratada ou ainda a quantidade de biomassa a ser produzida.

O estudo realizado por Cruz *et al.* (2018) avaliou a biofixação de CO₂ pela microalga *Monoraphidium sp.*, cultivada inicialmente em Erlenmeyers de 250 mL e posteriormente escalonada em volumes maiores de 2 L e em FBR de 110 L. Neste experimento, foi determinado que aproximadamente 1,2 gramas de CO₂ foram consumidas por cada grama de biomassa produzida. Esse valor encontra-se alinhado à estequiometria da fotossíntese, evidenciando a alta capacidade dessa espécie microalgal em converter carbono inorgânico em matéria orgânica.

Conforme previamente descrito, com base em ensaios preliminares de Taher (2013), foi realizado o cálculo teórico da produtividade da biomassa seca bruta de microalgas em sistema *airlift* (12 L), em que as amostras de microalgas foram cultivadas em um período total de 15 dias, utilizando 2 tipos diferentes de meio de cultivo – meio CHU e efluente suíno biodigerido – com produção de 1 e 1,4 mg mL⁻¹, respectivamente.

A produção teórica total de microalgas foi de 12 g para o cultivo em meio CHU e de 16,8 g para o cultivo em efluente suíno biodigerido a 10 % de diluição em um sistema *airlift* de 12 L. Posteriormente, esse cálculo teórico foi extrapolado para o sistema de produção industrial de FBR de 12 m³, totalizando a produção em meio CHU estimou-se 12 kg e 16,8 kg para efluente suíno biodigerido a 10 % de diluição.

Os dados da análise elementar das amostras secas brutas de microalgas (TABELA 18), foram utilizados para a construção das fórmulas empíricas, número de mols e massa de CO₂ biofixados, referente a cada uma das amostras de biomassa microalgal e aos equivalentes estequiométricos dos *blends* de resíduos florestais, conforme apresentado na TABELA 20.

TABELA 20 – FÓRMULAS EMPÍRICAS E COMPOSIÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA DE BIOMASSA DE MICROAGAS E *BLENDS* DE RESÍDUOS FLORESTAIS

	Amostra bruta de microalgas		
	Dejeto – 2018	Dejeto– 2023	CHU – 2023
Fórmula empírica – Microalgas	C _{4,07} H _{7,32} N _{0,51} O _{2,29}	C _{3,83} H _{7,79} N _{0,54} O _{2,41}	C _{3,39} H _{7,20} N _{0,49} O _{2,82}
Mol de CO ₂ biofixado / mol de microalgas	4,07	3,83	3,39
Massa de CO ₂ biofixado (g)	179,17	168,47	149,27
Mol de Blend 1 (C _{4,06} H _{6,30} N _{0,04} O _{2,77})	1,003	0,943	0,835
Mol de Blend 2 (C _{3,84} H _{5,91} N _{0,06} O _{2,95})	1,060	0,997	0,883
Mol de Blend 3 (C _{3,94} H _{5,94} N _{0,02} O _{2,90})	1,033	0,972	0,860

FONTE: A autora (2025).

Para a produção de 100 g da amostra bruta dejeto 2018 (1 mol), necessita-se de 4,07 mol de carbono, que é a mesma quantidade estequiométrica de mol de CO₂ biofixado pela microalga. Da mesma forma, também foi realizado a relação estequiométrica de 1 mol de amostras brutas dejeto 2023 e CHU 2023, sendo necessários 3,83 e 3,39 mol de CO₂ biofixados, respectivamente.

Também foi realizado o cálculo estequiométrico necessário para a produção de CO₂ por meio da combustão de cada um dos 3 *blends* de resíduos florestais, de acordo com os dados da análise elementar (TABELA 18), para a produção de cada microalga estudada (dejeto 2018, dejeto 2023, CHU 2023).

A relação estequiométrica entre a biomassa microalgal produzida e incineração dos *blends* de resíduos florestais, é apresentada na TABELA 20.

É válido ressaltar que os dados apresentados, são cálculos teóricos com 100 % de conversão extrapolados do *airlift* para 12.000 L do FBR.

Considerando todos os cálculos realizados, para a produção de 12 kg de biomassa microalgal em FBR's cultivada em meio CHU, e 16,8 kg de biomassa microalgal em FBR's cultivada em efluente suíno biodigerido diluído a 10 %, seriam necessárias as quantidades dos respectivos *blends* dispostos na TABELA 21.

TABELA 21– MASSA TEÓRICA DE RESÍDUOS FLORESTAIS PARA PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM FBR'S DE 12.000 L

Biomassa de microalgas	Massa de resíduo florestal (kg)		
	Blend 1	Blend 2	Blend 3
Dejeto 2018	16,85	17,81	17,35
Dejeto 2023	15,84	16,75	16,33
CHU 2023	10,02	10,60	10,32

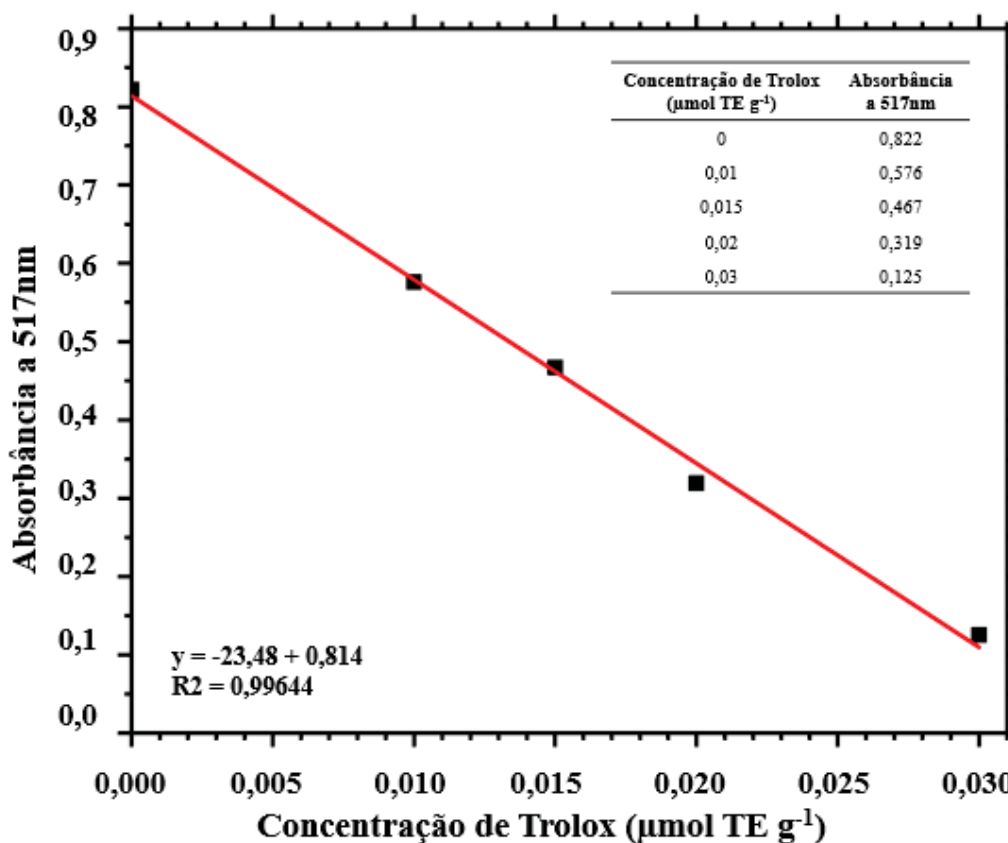
FONTE: A autora (2025).

Tecnologias de FBR's têm evoluído para superar desafios de escala e custo, incluindo designs inovadores e bioquímicos para maximizar a conversão de carbono. Por sua vez, o manejo de resíduos florestais via processos como a pirólise insere-se na economia circular de baixo carbono, convertendo resíduos em insumos, (por exemplo, bioenergia), ao mesmo tempo em que sequestra carbono. A integração dessas abordagens – biofixação algal e sequestro de carbono – compõe um portfólio promissor de tecnologias negativas em carbono.

5.1.6 Atividade antioxidante da biomassa microalgal seca

A determinação da atividade antioxidante da biomassa de *Tetradismus obliquus* foi realizada por meio do método DPPH, e os resultados foram expressos em equivalentes de Trolox ($\mu\text{mol TE g}^{-1}$). Na FIGURA 28 é apresentada a curva de padronização obtida com o padrão Trolox, utilizada como base para os cálculos de capacidade antioxidante das amostras analisadas.

FIGURA 23 – CURVA DE PADRONIZAÇÃO DO TROLOX ($\mu\text{mol TE g}^{-1}$)



FONTE: A autora (2025).

Com base na avaliação da atividade antioxidante usando o método espectrofotométrico, não foi observada nenhuma alteração significativa no padrão de absorbância de nenhuma das sete amostras testadas na presença de DPPH, conforme mostrado na TABELA 22.

TABELA 22 – DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS E SUAS RESPECTIVAS CONDIÇÕES DE AQUISIÇÃO

Amostras	Condições de obtenção	Volume de solução de amostra	DPPH	Absorbância
1	(bruta – dejetto – 2018) – fsm	0,2 mL	60 mM	0,948 nm
2	(residual – dejetto – 2018) fsm	0,2 mL	60 mM	0,771 nm
3	(bruta – dejetto – 2023) – fsm	0,2 mL	60 mM	0,953 nm
4	(residual – dejetto – 2023) – fsm	0,2 mL	60 mM	0,956 nm
5	(bruta – CHU – 2023) – fsm	0,2 mL	60 mM	0,912 nm
6	(residual – CHU – 2023) – fsm	0,2 mL	60 mM	0,966 nm
7	(óleo de destilação) – 1 mg/mL em metanol	0,2 mL	60 mM	0,886 nm
8	Amostra líquida – Inóculo	0,3 mL	60 mM	1,620 nm
Controle negativo	(ausência de amostra)	0	60 mM	0,758 nm

FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: **fsm**: fração solúvel em metanol.

De acordo com as observações da TABELA 22, nenhuma atividade antioxidante foi expressa em termos de equivalentes de Trolox em nenhuma das 8 amostras analisadas, pois não havia sinais indicativos dessa atividade nas condições experimentais avaliadas. A análise espectrofotométrica foi realizada usando a técnica DPPH, em que a absorbância foi medida em 517 nm. As amostras foram preparadas nas condições descritas e todas apresentaram valores de absorbância próximos ao controle negativo, indicando a ausência de compostos com atividade antioxidante nas condições experimentais avaliadas.

É possível apontar alguns fatores prováveis para os resultados negativos. *T. obliquus* pode ter antioxidantes principalmente na forma de carotenoides trans e outros compostos menos reativos com DPPH (Aluç, Kök e Tüzüm, 2022). Além disso, as condições de cultivo não favoreceram a síntese de polifenóis ou de antioxidantes potentes em que a biomassa pode não conter quantidade apreciável de sequestradores de radicais livres. Por exemplo, culturas em fase exponencial ou com nutrientes abundantes podem priorizar crescimento (proteínas, pigmentos fotossintéticos para captação de luz), em detrimento de metabólitos secundários antioxidantes. (Khodadadianzaghmari *et al.*, 2024). Dessa forma, é plausível que as

amostras nas condições avaliadas não possuam antioxidantes suficientes ou do tipo mais adequado para reagir com DPPH em nível detectável.

Entretanto, mesmo que a microalga possua compostos antioxidantes, interferências ópticas e artefatos de medição podem mascarar seu efeito no ensaio DPPH. A coloração esverdeada intensa das amostras, especialmente no inóculo úmido e em extratos concentrados da biomassa, indica a presença de alta concentração de clorofilas e derivados. Esses pigmentos podem causar dois tipos de interferência: (i) absorção de fundo – clorofilas e carotenoides absorvem luz na faixa do visível, inclusive próximo a 515 nm, adicionando absorbância que não se deve ao DPPH; e (ii) fluorescência/emissão secundária – a clorofila *a* emite fluorescência vermelha ou mesmo por luz verde, o que pode alterar a intensidade de luz detectada pelo espectrofotômetro se parte da fluorescência for captada no detector (Alotaiby *et al.*, 2024).

Embora o ensaio DPPH não envolva excitação intencional de fluorescência, amostras altamente pigmentadas podem introduzir ruído no sinal. Além disso, estudos recentes apontaram que derivados da clorofila exibem seus próprios picos de absorbância e até alguma reatividade, podendo obscurecer os resultados do DPPH quando presentes em altas concentrações. Há relatos de interferência entre derivados de clorofila e o radical DPPH a 515 nm, especialmente em concentrações elevadas de pigmentos, o que dificulta a interpretação dos dados (Alotaiby *et al.*, 2024).

O efeito FRET (*Fluorescence Resonance Energy Transfer*), é menos comum de ocorrer, porém, não pode ser descartado. Pode ser que ocorra alguma forma de transferência de energia entre moléculas do extrato. O FRET clássico requer um doador fluorescente e um aceitador, cuja banda de absorção se sobreponha à emissão do doador. As clorofilas fluorescem na faixa vermelha (~680 nm), o DPPH em si não é fluorescente, porém, seus produtos de redução ou outras impurezas poderiam interagir. Ainda que a literatura não reporte explicitamente FRET entre clorofila e DPPH, é possível extrapolar que fenômenos de emissão ou transferência de energia em amostras altamente pigmentadas podem perturbar o equilíbrio do radical de forma indireta (Hussain *et al.*, 2015; Alotaiby *et al.*, 2024; Khodadadianzaghmari *et al.*, 2024).

No que diz respeito ao óleo de destilação, as altas temperaturas empregadas podem degradar compostos antioxidantes naturais (por exemplo, carotenoides e

tocoferóis se degradam termicamente) e gerar produtos secundários. Os óleos de pirólise de biomassa algal geralmente contêm misturas complexas, como fenóis ou componentes celulósicos. *T. obliquus*, por ser microalga clorofícea, tem parede celular relativamente simples (polissacarídeos e glicoproteínas), portanto, seu bio-óleo pirolítico pode não conter frações fenólicas antioxidantes significativas. Além disso, esse óleo frequentemente é rico em compostos orgânicos voláteis e resinas que podem até conferir certa atividade redutora (devido a fenóis simples formados na degradação térmica de proteínas ou carotenoides), mas também podem interferir nas medidas. Compostos escuros ou fluorescentes no óleo, podem atrapalhar a detecção espectrofotométrica (Coulombier, Jauffrais e Lebouvier, 2021; Gouveia *et al.*, 2021).

Em suma, o óleo destilado de *T. obliquus* dificilmente exibirá alta capacidade de sequestrar DPPH, pois precisa dos principais agentes antioxidantes hidrofílicos, e pode ainda apresentar interferências ópticas no ensaio espectrofotométrico.

Os resultados indicam que, nas condições experimentais avaliadas, não houve diminuição significativa da absorbância na presença de DPPH, sugerindo que as amostras de biomassa seca, óleo de destilação e inóculo (biomassa líquida) não apresentaram atividade antioxidante relevante quando comparadas ao controle negativo.

A falta de atividade antioxidante significativa nas amostras avaliadas sugere a necessidade de mais pesquisas. Outros métodos de extração de compostos antioxidantes podem ser explorados, ou testes podem ser realizados em diferentes condições de cultivo para elucidar o potencial antioxidante das amostras avaliadas.

5.1.7 Determinação do teor de proteínas de biomassa microalgal seca

A composição da biomassa de algas é frequentemente o principal impulsionador da viabilidade econômica da pesquisa e do desenvolvimento de produtos comerciais baseados em algas. À medida que o campo de produção comercial de algas se expande, há uma necessidade crescente de uma linguagem padronizada entre produtores e mercados em termos de caracterização de biomassa (Lane *et al.*, 2021).

Cultivar as microalgas em meios com deficiência de N pode ser um dos fatores mais eficientes para aumentar a concentração lipídica das microalgas. A deficiência de N aumenta a quantidade de lipídios, altera a produtividade da biomassa. O fato é que as microalgas alterarem a sua composição bioquímica em condições ambientais variáveis. A concentração de nitrogênio no meio de cultivo influencia diretamente a composição da biomassa, afetando a taxa de crescimento e a proporção de macromoléculas armazenadas (Akgül, 2024; Wei *et al.*, 2022).

O trabalho de Akgül (2024) mostrou que sob condições de deficiência de nitrogênio, houve uma diminuição na taxa de crescimento específico e no teor de proteína de *T. obliquus*, enquanto o conteúdo lipídico aumentou. Valores do teor de proteína variaram entre 47,62 % e 47,82 %, de massa seca, foram obtidos em meios com 75% e 50% de nitrogênio disponível, respectivamente. Além disso, pesquisas sobre a utilização de *T. obliquus* em remediação de águas residuais demonstraram sua capacidade de absorver compostos nitrogenados e sintetizar proteínas a partir desses nutrientes (Vladić *et al.*, 2023).

Na TABELA 23 é apresentada uma comparação dos resultados referentes à determinação de proteínas pelo método Kjeldahl e análise elementar (Dumas).

TABELA 23 – DETERMINAÇÃO PROTÉICA PELOS MÉTODOS KJELDAHL E ELEMENTAR (DUMAS)

Amostra	%N Kjeldahl		%Proteína		%N elementar		%Proteína	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
1	8,70	± 0,87 ab	44,22	± 4,43 ab	7,18	± 0,02 bc	36,50	± 0,11 bc
2	10,78	± 2,18 a	54,74	± 11,06 a	7,12	± 0,02 c	36,17	± 0,07 c
3	7,23	± 0,39 ab	36,74	± 1,97 ab	7,21	± 0,05 bc	36,63	± 0,29 bc
4	8,50	± 0,21 ab	43,18	± 1,05 ab	7,56	± 0,12 a	38,38	± 0,61 a
5	5,08	± 0,58 b	25,78	± 2,96 b	7,43	± 0,07 ab	34,57	± 0,11 ab
6	6,98	± 0,39 ab	35,48	± 1,99 ab	6,81	± 0,02 d	37,74	± 0,36 d

FONTE: A autora (2025).

LEGENDA: 1: Biomassa bruta – dejetos -2018; 2: Biomassa residual – dejetos – 2018; 3: Biomassa bruta – dejetos – 2023; 4: Biomassa residual – dejetos – 2023; 5: Biomassa bruta – CHU – 2023; 6: Biomassa residual – CHU – 2023. $\bar{x}$ = média; s = desvio padrão. Letras minúsculas em negrito seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os componentes em uma significância de 5 % usando o teste de Tukey.

A determinação do teor de proteínas em amostras de biomassa, como microalgas, é frequentemente realizada pelos métodos Kjeldahl e análise elementar (Dumas). Ambas as técnicas determinam o conteúdo total de nitrogênio, porém se diferenciam pelo processo analítico empregado (Ghislain *et al.*, 2022).

O método Kjeldahl é amplamente reconhecido e envolve três etapas principais: digestão, destilação e titulação reversa, sendo considerado como método

oficial para determinação proteica em alimentos pela *Association of Official Analytical Chemists (AOAC) International*. Este método depende da conversão do nitrogênio orgânico presente na amostra em amônia, seguida pela sua quantificação. Por outro lado, o método Dumas consiste na combustão das amostras, liberando nitrogênio na forma gasosa, que é diretamente quantificado por um detector de condutividade térmica após remoção de interferentes como dióxido de carbono e água. Uma vantagem significativa do método Dumas sobre Kjeldahl é a rapidez e o uso reduzido de reagentes perigosos, além de utilizar quantidades menores de amostra. Contudo, ambos métodos podem sofrer interferências, levando a resultados divergentes, especialmente na presença de compostos nitrogenados não proteicos, que afetam o fator padrão de conversão de nitrogênio em proteína (geralmente 6,25), podendo resultar em sub ou superestimação do teor proteico real (Ghislain *et al.*, 2022).

No estudo realizado por Cruz *et al.* (2018), o teor proteico da biomassa da microalga *Monoraphidium sp.* cultivada em FBR de 100 L sob condições controladas foi determinado pelo método Kjeldahl após as etapas de centrifugação e liofilização. Os autores relataram um valor de 34,26% de proteína na biomassa avaliada.

Em uma revisão sobre proteínas microalgais, Xu *et al.* (2024) relataram que algumas espécies podem apresentar teores proteicos superiores a 60% em base seca, principalmente quando cultivadas sob condições ótimas de disponibilidade de nitrogênio. Além disso, outras pesquisas indicam que a proteína da biomassa de *Tetradismus obliquus* pode variar amplamente em função da limitação de nutrientes e das estratégias de extração adotadas (Janssen, Wijffels e Barbosa, 2022).

O estudo realizado por Lane *et al.*, 2021 investigou a composição elementar e o teor proteico das microalgas *Scenedesmus acutus* e *Nannochloropsis salina*. A caracterização envolveu a determinação de cinzas, carbono e nitrogênio elementares, bem como a estimativa do teor proteico a partir do conteúdo de nitrogênio obtido. Os resultados reportados para o teor proteico foram de 40,92% para *Scenedesmus acutus* e 31,98% para *Nannochloropsis salina*. As diferenças entre esses valores são atribuídas, principalmente, à aplicação de fatores de conversão que foi aplicado para cada espécie: 6,25 para *Scenedesmus*, que é amplamente adotado na literatura, e 4,78 para *Nannochloropsis*, considerando-se as particularidades da composição de aminoácidos dessas microalgas.

Em suma, as médias de proteína determinadas no presente estudo variaram entre 40,02 % (método de Kjeldahl) e 36,66 % (análise elementar). Esses valores estão de acordo com as faixas comumente relatadas na literatura para microalgas. É importante destacar que a biomassa analisada neste estudo foi produzida em escala industrial e submetida a diversas condições de estresse físico-químicos ao longo do processo produtivo, incluindo exposição a gases de exaustão, variações climáticas, floculação e altas temperaturas. Ainda assim, os teores de proteína obtidos permaneceram consistentes com os valores descritos na literatura, reforçando a aplicabilidade biotecnológica e industrial da biomassa.

5.1.8 Publicações

Ao longo da revisão bibliográfica, que passou por constante atualização, novos trabalhos relevantes ao tema foram publicados. Esses estudos destacados estão apresentados na Tabela F.1.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi investigado o potencial energético dos resíduos florestais provenientes de poda arbórea da Universidade Federal do Paraná, para serem utilizados em um sistema de incineração acoplado a FBR industriais para produção de microalgas por meio da biofixação de CO₂. Dessa forma, além da caracterização físico química desses resíduos, foi realizada a mesma caracterização para a biomassa seca de microalgas produzida. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

I – Observou -se que os resíduos florestais provenientes de poda arbórea, mesmo que bastante heterogêneos, apresentaram PCI de 22,44 MJ kg⁻¹;

II – A biomassa seca de microalgas também possui apresentou PCI de 21,24 MJ kg⁻¹;

III – A estimativa da produtividade microalgal confirmou a viabilidade da integração entre incineração de resíduos florestais e cultivo de microalgas em FBRs, evidenciando seu potencial como tecnologia de sequestro de carbono;

IV – Além disso, não foi encontrado atividade antioxidante das amostras de biomassa de microalgas, nas condições avaliadas;

V – Na determinação do teor proteico das amostras de biomassa seca de microalgas, este variou entre 40,02 % (método de Kjeldahl) e 36,66 % (análise elementar – Dumas), respectivamente. Esses resultados estão dentro dos valores encontrados na literatura para microalgas no que diz respeito a utilização para aplicações biotecnológicas.

Visto isso, além da viabilidade de utilização de resíduos florestais com potencial energético, por meio desse sistema em escala industrial, é possível gerar biomassa com valor agregado. Além disso, ressalta-se que a biomassa de microalgas com maior teor de proteína, refere-se a biomassa cultivada a partir de dejetos suíno biodigeridos na concentração de 10 %. Refletindo o potencial energético, tanto dos resíduos incinerados quanto da biomassa de microalgas que também foi obtida como produto de valor agregado nesse processo que atende abordagens do desenvolvimento sustentável.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Os resultados obtidos neste estudo demonstram o potencial dos resíduos florestais como alternativa sustentável para geração de energia e a viabilidade do cultivo de microalgas em FBR's industriais acoplados a sistemas de incineração. No entanto, alguns aspectos podem ser aprofundados para aprimorar a aplicação dessa tecnologia e ampliar seu impacto ambiental e econômico.

Dessa forma, recomenda-se que sejam realizadas as seguintes análises:

- (i) Análise experimental de determinação dos gases gerados a partir da incineração de resíduos florestais;
- (ii) Utilização de outras técnicas para avaliação antioxidante de biomassa de microalgas;
- (iii) Repetição da determinação de proteínas pelo método Kjeldahl;
- (iv) Avaliação do perfil de cinzas tanto no que diz respeito a incineração de resíduos florestais quanto da biomassa de microalgas;
- (v) Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do processo de incineração de resíduos florestais, com o objetivo de comparar a pegada de carbono e a eficiência energética do sistema proposto em relação a métodos convencionais e avaliar os impactos ambientais ao longo desse processo.

A continuidade dessas investigações pode contribuir para o aprimoramento das tecnologias sustentáveis e para a implementação de novos modelos de gestão de resíduos e produção de biomassa, consolidando a integração entre energia renovável e aplicações biotecnológicas.

REFERÊNCIAS

- ACIÈN, F. G.; MOLINA, E.; REIS, A.; TORZILLO, G.; ZITTELLI, G. C.; SEPÚLVEDA, C.; MASOJÍDEK, J. Photobiorreactors for the production of microalgae. In: Woodhead Publishing Series in Energy. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts**. Woodhead Publishing, p.1-44. 2017.
- ADMIRASARI, R.; RIFAI, A.; PRAYITNO, J.; SANTOSO, A.D. Microalgae Photobioreactor for Carbon Dioxide Fixation and Production of Biofuel Feedstock. **IOP Conference Series Earth and Environmental Science**, v.1187, n.1. 2023.
- AFIFY, A.E.M.M.R.; BAROTY, G.S.E.; BAZ, F.K.E.; BAKY, H.H.A.E.; MURAD, S.A. Scenedesmus obliquus: Antioxidant and antiviral activity of proteins 111hydrolysed by three enzymes. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v.16, p.399-408. 2018.
- ANGGNO, W.; SUTRISNO; SUPRIANTO, F.D.; ARIFIN, F.X.Y.; GOTAMA, G.J. Combustion performance of Pterocarpus indicus leaves waste briquette with rejected papaya as binding agent. In **IOP conference series: earth and environmental science**, v.581, n.1. p.012020. 2020.
- AGHAALIPOUR, E.; AKBULUT, A.; GÜLLÜ, G. Carbon dioxide capture with microalgae species in continuous gas-supplied closed cultivation systems. **Biochemical Engineering Journal**, v. 163, p.107741. 2020.
- AGUIAR, E. S.; RIBEIRO, M. M.; VIANA, J. H.; PONTES, A. N. Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.13. 2021.
- AKGÜL, R. Growth performance and biochemical composition of *Tetradasmus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne in media with different nitrogen concentrations. **Ciência Rural**, v.54, n.9. 2024.
- ALGAE BASE. Disponível em: <https://www.algaebase.org/search/species/detail/?species_id=158061> Acesso em: 20 de Junho de 2022.
- ALOTAIBY, S.; ZHAO, X.; BOESCH, C.; SERGEEVA, N. Sustainable approach towards isolation of photosynthetic pigments from Spirulina and the assessment of

their prooxidant and antioxidant properties. **Food Chemistry**, v.436, art.137653. 2024.

ALÜÇ, Y.; KÖK, O.; TÜZÜM, İ. Profiling l carotenoids of microalgae (*Scenedesmus obliquus*) extract by HPLC and its antioxidant capacity. **Journal of Applied Biological Sciences**, v.16, n.2, p.206-219.2022.

ANSARI, F.A.; GULDHE, A.; GUPTA, S.K.; RAWAT, I.; BUX, F. Improving the feasibility of aquaculture feed by using microalgae. **Environmental Science and Pollution Research**, v.28, p.43234-43257. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14660:2004. Madeira – Amostragem e preparação para análise**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10007:2004. Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, p.25. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 14929: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa**, 2017.

ASTM D-1762-84 (Reapproved 2013) – Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AUDI, M.; ALI, A.; KASSEM, M. Greenhouse Gases: A Review of Losses and Benefits. **International Journal of Energy Economics and Policy**, v.10, n.1, p.403-418. 2020.

BAGCHI, S.K.; MALLICK, N. Carbon dioxide biofixation and lipid accumulation potential of an indigenous microalgae *Scenedesmus obliquus* (Turpin) Kützing GA 45 for biodiesel production. **RCS Advances**, v.6, n.36, p.29889-29898. 2016.

BAHADORI, A.; ZAHEDI, G.; ZENEHBOUDI, S.; JAMILI, A. Estimation of the effect of biomass moisture content on the direct combustion of sugarcane bagasse in boilers. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 33, p. 349–356, 2014.

BARSANTI, L.; GUALTIERI, P. Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? **Algal Research**, v.31, p.107-115. 2018.

BOUSDIRA, K.; NOURI, L.; LEGRAND, Y.; BAFLOULOU, Y.; ABISMAIL, M.; CHEKHAR, H.; BABAHANI, M. An overview of the Chemical composition of

phoenicicole biomass fuel in Guerrara oasis. **Revue des Energies Renouvelables**, v.14, p.99 – 108. 2014.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 02 DE AGOSTO DE 2010. Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Brasília, DF, Agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 28 nov. 2020.

BURUIANA, D.L.; SACHELARIE, A.; BUTNARU, C.; GHISMAN, V. Important contributions to reducing Nitrogen oxide emissions from internal combustion engines. **International Journal of Environment Research and Public Health**, v.18, n.17. 2021.

CARVALHO JUNIOR, J.A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

CASTRO, A. A.; KONRAD, O.; MARDER, M.; GUERINI FILHO, M. Cultivo de microalgas para tratamento de águas residuais: revisão de literatura. **Revista GEMA, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, v.6, n.2, p.60-71. 2020.

CHEN, P.; MIN, M.; CHEN, Y.; WANG, L.; LI, Y.; CHEN, Q.; WANG, C.; WAN, Y.; WANG, X.; CHENG, Y.; DENG, S.; HENNESSY, K.; LIN, X.; LIU, Y.; WANG, Y.; MARTINEZ, B.; RUAN, R. Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 2, n. 4, p. 1-30, 2009.

CHEN, L.; MSIGWA, G.; YANG, M.; OSMAN, A.I.; FAWZY, S.; . ROONEY, D.W.; Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.20, p.2277–2310. 2022.

CHIU, S.; KAO, C.; CHEN, C.; KUAN, T.; ONG, S.; LIN, C. Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. **Bioresource technology**, v. 99, n. 9, p. 3389-3396. 2008.

CHOI, H. I.; SUNG, Y, J.; HONG, M. E.; HAN, J.; MIN, B. K.; SIM, S. J. Reconsidering the potential of direct microalgal biomass utilization as end-products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.155. 2022.

CHU, S. P. The influence of the mineral composition if the medium on the growth of planktonic algae. **Journal of Ecology**, v. 30, p. 284–325. 1942.

COULOMBIER, N.; JAUFFRAIS, T.; LEBOUVIER, N. Antioxidant Compounds from Microalgae: A Review. **Marine Drugs**, v,19, n.10, p.549. 2021.

CONAMA. **CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**. CONAMA nº 481 de 03 de outubro de 2017. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19334673/do1-2017-10-04-resolucao-n-481-de-3-de-outubro-de-2017-19334583 Acesso em: 14 JUN de 2022.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

CORTÉS-HERRERA, C.; QUIRÓS-FALLAS, S.; CALDERÓN-CALVO, E.; CORDERO-MADRIGAL, R.; JIMÉNEZ, L.; GRANADOS-CHINCHILLA, F.; ARTAVIA, G. Nitrogen/protein and ne-step moisture and ash examination in foodstuffs: Validation case analysis using automated combustion and thermogravimetry determination under ISO/IEC 17025 guidelines. **Current Research in Food Science**, v.4, p.900-909. 2021.

COSTA, Iago Gomes. **Desenvolvimento do processo de extração de óleo de microalgas e produção de combustível à base de hidrocarbonetos puros**. 2018. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/57680>. Acesso em: 09 abr. 2024.

COSTA, Iago Gomes. **Desenvolvimento do processo de extração e destilação do óleo bruto de microalgas para a produção de hidrocarbonetos (green Diesel)**. 2023. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/57680>. Acesso em: 09 abr. 2024.

CRISÓSTOMO, M.C.; SILVA, M.F.; VALE, A.T.; CHAVES, B.S. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus* sp., *T. vulgaris* e *P. lecointeu*. DOI: 10.37885/210203270. Capítulo 4, p. 49-61. 2021.

CRUZ, Y.R.; DÍAZ, G.C.; LEONETT, A.Z.F.; CARLIZ, R.G; ROSSA, V.; GALINDO, M.; ARANDA, D.A.G.; OLIVEIRA, L.B. Biofixação de CO₂ pela microalga *Monoraphidium* sp. em FBR fechado tipo janela: produção de biomassa e caracterização da biomassa microalgal. **Acta Scientiae & Technicae**, v.6, n.1, 2018.

ÇAKIRSOY, I.; MIYAMOTO, T.; OHTAKE, N. Physiology of microalgae and their application to sustainable agriculture: A mini-review. **Frontiers in Plant Science**, v. v.13, p.1-9. 2022.

DEBOWSKI, M.; KRZEMIENIEWSKI, M.; ZIELIŃSKI, M.; KAZIMIEROWICZ, J. Immobilized Microalgae-Based Photobioreactor for CO₂ Capture (IMC-CO₂PBR): Efficiency Estimation, Technological Parameters, and Prototype Concept. **Atmosphere**, v.12, n.12, n.8, p. 1031. 2021.

DEITOS, T.; ARAÚJO, L.R.; BERTUOLO, C.; FREITAS, L.G.; PEREIRA, I.V.; LOPES, A.N.S.; FREITAS, N.D.; OLIVEIRA, C.E.M.; CERQUEIRA, H.G.; HERNÁNDEZ, Y.D.; ARAÚJO, N.M.F.T.S.; MEDEIROS, A.C.P. Sustentabilidade e inovação em energias verdes: biomassa como alternativa energética renovável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v.18, n.10, 2024.

DEPRÁ, M. C.; DIAS, R. R.; SEVERO, I. A.; MENEZES, C. R., ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E. Carbon dioxide capture and use in photobioreactors: The role of the carbon dioxide loads in the carbon footprint. **Bioresource technology**, v.314, n.123745, p.1-10. 2020.

ELRAYIES, G. M. Microalgae: Prospects for greener future buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.18, p.1175-1191. 2018.

FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/items/55def12b-2a81-41e5-91dc-ac6c42f1cd0f>.

Acesso em: 14 JUL de 2024.

FARGHALI, M.; OSMAN, A.I.; UMETSU, K.; . ROONEY, D.W. Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v.20, p.2853–2927. 2022.

FARGHALI, M.; OSMAN, A.I.; CHEN, Z.; ABDELHALEEM, A; IHARA, I.; MOHAMED, I.M.A.; YAP, P.S.; ROONEY, D.W. Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 21, p.1381–1418. 2023.

FARUQUE, M.O.; HOSSAIN, M.M.; RAZZAK, S.A. Photoautotrophic cultivation, lipid enhancement, and dry biomass characterization of microalgae *Scenedesmus*

dimorphus for bioenergy application. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.48, p.16263-16280. 2023.

FERREIRA, H. G. R.; PEDROSO, G. M.; ALVES, R. G.; CAHLI, G. M.; MELLO, S. C. R. P. Resíduos sólidos urbanos (RSU): Uma análise do setor energético em ascensão com base no impacto ambiental e na qualidade de vida. **Revista Formação**, v.27, n.51, p.65-83. 2020.

FU, J.; HUANG, Y.; LIAO, Q.; XIA, A.; FU, Q.; ZHU, X. Photo-bioreactor design for microalgae: A review from the aspect of CO₂ transfer and conversion. **Bioresource technology**, v. 292, n. 121947, p.1-12. 2019.

FURTADO, T.S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; NEVES, M.D. Correlação entre o teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v.36, n.3, p.577- 582. 2012.

GALANTE, R. M. Análise e otimização termoeconômica de sistemas de geração de energia por incineração de resíduos com filtro biológico de emissões. **Tese** (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p.126. 2019.

GARBA, M.D.; USMAN, M.; KHAM, S.; SHEHZAD, F.; GALADIMA, A.; EHSAN, M.F.; GHANEM, A.S.; HUMAYUN, M. CO₂ towards fuels: A review of catalytic conversion of carbon dioxide to hydrocarbons. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 2. 2021.

GARCIA, A.; SILVA, J. A.; SANTOS, J. L.; BRAGA, C. F.; MENDONÇA, M. A.; KRAHENBUHL, M. A. Determination of the physical-chemical properties of solid waste for use in the pyrolysis process. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.8, n.3, p.547-556. 2019.

GAUTAM, K.; RAJVANSI, M.; CHUGH, N.; DIXIT, R.B.; KUMAR, G.R.K.; KUMAR, C.; SAGARAM, U.S.; DASGUPTA, S. Microalgal applications toward agricultural sustainability: Recent trends and future prospects. *In: Galanaskis CM, editor. Microalgae Cultivation Recovery of Compounds and Applications*. Cambridge MA, United States: Academic Press, Elsevier; pp. 339-379. 2021.

GHISLAIN, T.; DURET, X.; DIOUF, P.N.; LAVOIE, J.M. Lignocellulosic Biomass *In: Handbook of Characterization of Biomass, Biowaste and Related by-products*. Springer. Chapter 3, p.523. 2022.

GLOCKOW, T.; VELAZ, M.; MEISCH, L. KAPIESKI, D.; MEISSNER, K.; CASSAL, M.C.; KASTER, A.K.; RABE, K.; NIEMEYER, C. A photobioreactor for production of algae biomass from gaseous emissions of an animal house. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.107, n.24, p.7673-7684. 2023.

GOOGLE EARTH. VISTA AÉREA DO NPDEAS, CURITIBA, BRASIL. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-25.45209285,-49.23538522,917.82360921a,133.60775824d,35y,117.99850341h,24.81301665t,0r/data=MikKJwolCiExbzFkT2RrLTNfV2lzTERkdIVQbXhWV0M3dWVpMVM3ZHAgAToDCgEw>>. Acesso em 11 JUL. 2024.

GONÇALVES, J.; FREITAS, J.; FERNANDES, I.; SILVA, P. Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. **Sustainability**, v.15, n.16, p.12413. 2023.

GOUVEIA, L.; JAZIĆ, J.M.; FERREIRA, A.; MALETIĆ, S.; CVETKOVIĆ, D.; VIDOVIĆ, S.; VLADIĆ, J. Green approach for the valorization of microalgae *Tetradismus obliquus*. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v.24, p.100556. 2021.

GUPTA, P.L.; CHOI, S.L. Amini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. World **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v.31, p.1409-1417. 2015.

GURUVAIAH, M.; LEE, K. Utilization of flue gas from coal burning power plant for microalgae cultivation for biofuel production. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v.3, n.8, p.7-10. 2014.

HABITZREITER, T.L.; ADAMI, P.F.; BRUN, E.J.; BATISTA, V.V.; FERREIRA, M.L.; GIACOMEL, C.L. Calorific value and economic feasibility of total or partial use of the *Eucalyptus* biomass. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.18, n.3, p. 282-288. 2019.

HO, S.; KONDO, A.; HASUNUMA, T.; CHANG, J. Engineering strategies for improving the CO₂ fixation and carbohydrate productivity of *Scenedesmus obliquus* CNW-N used for bioethanol fermentation. **Bioresource technology**, v. 143, p. 163-171. 2013.

HOBBIE, S. E.; GRIMM, N. B. Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. **Philosophical Transactions Royal Society B**, v. 375, n.20190124. 2020.

HUANG, C.W., HUNG, Y.C., CHEN, L.Y., ASATIANI, M., KLARSFELD, G., MELAMED, D., FARES, B., WASSER, S.P., MAU, J.L. Antioxidant activities of hot water extracts from mycelial biomass of different combinations of medical agaricomycetes mushrooms”. **International Journal of Medical Mushrooms**, v.24, n.8, p.21-30. 2022.

HUSSAIN, S.A.; CHAKRABORTY, S.; ROY, A.D.; DEBNATH, P.; DEY, D.; SASHA, J.; CHAKRABORTY, S.; BHATTACHARJEE, D. Fluorescent Resonance Energy Transfer (FRET) sensor. **Journal of Spectroscopy and Dynamics**, v.5, n.7, p.1-16. 2015.

ISO 18125:2017. Solid Biofuels — Determination of Calorific Value. International Organization for Standardization, Geneva, 2017.

ISLAM, Md.N.; RATUL, S.B.; SHARMIN, A.; RAHMAN, K.S.; ASHADUZZAMAN, Md.; UDDIN, G.M.N. Comparison of calorific values and ash content for different woody biomass components of six mangrove species of Bangladesh Sundarbans. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**, v.16, p.110-117. 2019.

JANSSEN, M.; WIJFFELS, R.H.; BARBOSA, M.J. Microalgae based production of single-cell protein. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 75, n.102705, p.1-8. 2022.

JACOB-FURLAN, B.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I. A.; GONÇALVES, R. S. R.; MARTINS, L. S.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Imobilização de *Tetrademus obliquus* em matriz de alginato para biorremediação de efluentes. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). **Microalgas: potenciais aplicações e desafios**. Merida Publishers, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1>.

JACOB-FURLAN, B.; ZATTA, P.H.S.; ANTEZANA, V.C.P.; MARTINS, L.S.; MARIANO, A.B. **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia**, v.6, p.1-8. 2022.

JANSEN, M.; WIFFLELS, R.; BARBOSA, M. Microalgae-based production of single-cell protein. **Current Opinion in Biotechnology**, v.75, p.102705. 2022.

JAPAR, A.; TAKRIFF, M.; YASIN, N. H. M. Microalgae acclimatization in industrial wastewater and its effect on growth and primary metabolite composition. **Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts**, v.53, p.102163. 2021.

KARGUPTA, W.; GANESH, A.; MUKHERJI, S. Estimation of carbon dioxide sequestration potential of microalgae grown in a batch photobioreactor. **Bioresource technology**, v.180, p. 370–375. 2015.

- KATAKI, R.; KONWER, D. Fuel characteristics of indigenous tree species of north-east India. **Biomass and bioenergy**, v.22, p.433-437. 2002.
- KAO, C.Y.; CHEN, T.Y.; CHANG, Y.B.; CHIU, T.W.; LIN, H.Y.; CHEN, C.D.; CHANG, J.S.; LIN, C.S. Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp. **Bioresource Technology**, v.166, p.485-493. 2014.
- KHODADADIANZAGHMARI, F.; JAHADI, M.; GOLI, M. Biochemical profile of *Scenedesmus* isolates, with a main focus on the fatty acid profile. **Food Science & Nutrition**, v.12, n.8, p.5922–5931, 2024.
- KJEDAH, J. 'Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern'. **Zeitschrift für Analytische Chemir**, v.22, n.1, p.366-382. 1883.
- KUMAR, J.I.N.; PATEL, K.; KUMAR, R.N.; BHOI, R.K. An evaluation of fuelwood properties of some Aravally mountains tree and shrub species of Western India. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.1, p.411-414. 2011.
- LA BELLA, E.; BAGLIERI, A.; FRAGALÀ, F.; PUGLISI, I. Multipurpose Agricultural Reuse of Microalgae Biomasses Employed for the Treatment of Urban Wastewater. **Agronomy**, v.12, n.2, p.234. 2022.
- LANE, M.; WYCHEN, S.V.; POLITIS, A.; AURENS, L.M.L. A data-driven comparison of commercially available testing methods for algae characterization. **Algal Research**, v.5, p.102134. 2021.
- LEE, E.; JALALIZADEH, M.; ZHANG, Q. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. **Algae Research**, v.12, p. 497-512. 2015.
- LEE, S.Y.; LEE, J.S.; SIM, S.J. Enhancement of microalgae biomass productivity through mixotrophic cultures process utilizing waste soy sauce and industrial flue gas. **Bioresource Technology**, v.373. n.128719, p.1-10. 2023.
- LI, Z.; SONG, Z.; YAN, Z.; HAO, Q.; SONG, A.; LIU, L.; YANG, X.; XIA, S.; LIANG, Y. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.26. 2018.
- LI, J.; TANG, X.; PAN, K.; ZHU, B.; WANG, Z.; ZHAO, Y. Application study for the high CO₂ tolerant *Chlorella* strain by flue gas culture: Evaluation of growth performance and adaptive mechanisms. **Chemical Engineering Journal**, v.479, n.147700, p.1-10. 2024.

LIU, X.; CHEN, G.; TAO, Y.; WANG, J. Application of effluent from WWTP in cultivation of four microalgae for nutrients removal and lipid production under the supply of CO₂. **Renewable Energy**, v.149(C), p. 708-715. 2020.

LIRIO, F. R. Adição da biomassa da microalga *Tetradismus obliquus* em ração canina, com modelagem matemática do processo produtivo e da geração de nutrientes. 2019. **Tese**. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/66856#:~:text=Os%20resultados%20obtidos%20mostraram%20que,ingerida%20da%20ra%C3%A7%C3%A3o%20tratamento%20foi>. Acesso em: 17 jun 2024.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v.37, p.26-44. 2015.

LOO, Sjaak van; KOPPEJAN, Jaap (ed.). The handbook of biomass combustion and co-firing. London; Sterling, VA: Earthscan, 2008.

LUFTECH SOLUÇÕES AMBIENTAIS LTDA. **Manual de Operação e Manutenção do Incinerador RGL 200 S**. Alvorada-RS: Luftech Soluções Ambientais Ltda., 2023. 45 p. Manual Técnico.

LUNGULEASA, A.; SPIRCHEZ, C.; ZELENIU, O. Evaluation of the calorific values of waste from some tropical species. **Maderas, Ciencia y tecnología**, v.22, n.3, p.269-280. 2020.

MAGALHÃES, I.B.; FERREIRA, J.; CASTRO, J.S.; ASSIS, L.R.; CALIJURI, M.L. Agro-industrial wastewater-grown microalgae: A techno-environmental assessment of open and closed systems. A. **Science of the Total Environment**, v.834, p. 1-14. 2022.

MAGALHÃES, I.B.; PEREIRA, A.S.A.P.; SILVA, T.A.; RENATO, N.S. Predicting the higher heating value of microalgae biomass based on proximate and ultimate analysis. B. **Algal Research**, v.64, n.102677. 2022.

McALLISTER, S.; CHEN, J.-Y.; FERNANDEZ-PELLO, A. C. **Fundamentals of combustion processes**. New York: Springer, 2011.

MAHAJAN, R.; CHANDEL, S.; PUNIYA, A.K.; GOEL, G. Effect of pretreatments on cellulosic composition and morphology of pine needle for possible utilization as substrate for anaerobic digestion. **Biomass and Bioenergy**, v.141, n.105705, p.1-10. 2020.

MALLICK, N. C.; MOZAMMIL, S.; KOSHTA, E. Investigation on *Chlorella* sp. HS2 microalgae growth using CO₂ from engine exhaust to study carbon sequestration. **Biofuels**, v.15, n. 3, p.279-290. 2024.

MANTOVANI, L.P.; LEITE, A.R.; MANTOVANI, J.P.M.; SIMÕES, B.N.S.; GONÇALVES, E.S.S.; NEVES, F.P.; RIBEIRO, V.G. Biomassa e energia. **Revista Agronomia Brasileira**, v.6. 2022.

MARTINEZ, J. G. B. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA FIXAÇÃO DE EMISSÕES DE GRUPO MOTOGERADOR POR CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATORES INDUSTRIAIS. 2018. **Dissertação**. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/55520?show=full>. Acesso: 19 jun 2024.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, 217-232. 2010.

MEKONEN, A.G., BERHE, G.G.; DESTA, M.B.; BELETE, F.A.; GEBREMARIAM, A.B. Production and characterization of briquettes from sugarcane bagasse of Wonji Sugar Factory, Oromia, Ethiopia. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v.13, p. 27–43. 2024.

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T. Global climate change and greenhouse effect. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, v.7, n.4, p.2897-2913. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Brasília. Disponível em: <
<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADuos-org%C3%A2nicos.html#o-que-sao-residuos-organicos>>. Acesso em 14 de junho de 2022.

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, v. 25, n.1, p.10-25. 2016.

MOUSAVI, S.; NAJAFPOUR, G.; MOHAMMADI, M. CO₂ bio-fixation and biofuel production in an airlift photobioreactor by an isolated strain of microalgae *Coelastrum* sp. SM under high CO₂ concentrations. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 30139-30150. 2018.

MORAIS, E. G.; CRISTOFOLI, N. L.; MAIA, I. B.; MAGINA, T.; CERQUEIRA, P. R.; TEIXEIRA, M. R.; VARELA, J.; BARREIRA, L.; GOUVEIA, L. Microalgal Systems for

Wastewater Treatment: Technological Trends and Challenges towards Waste Recovery. **Energies**, v.14, n.8112, p.1-26. 2021.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. 2020. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 28 de novembro de 2020.

MOSIBO, O.K.; FERRENTINO, G.; UDENIGWE, C.C. Microalgae Proteins as Sustainable Ingredients in Novel Foods: Recent Developments and Challenges. **Foods**, v.13, n.5. p.733. 2024.

MOSULE, R.; BONALES-REVUELTA, J.; MWAMPAMBA, T.H.; GALLARDO-ALVAREZ, R.M.; MASERA, O.; GARCÍA, C.A. Life Cycle Assessment of Forest-Derived Solid Biofuels: a Systematic Review of the Literature. **Bioenergy Research**, v.15, p. 1711–1732. 2022.

NEGI, S.; JASWAL, G.; DASS, K.; MAZUMDER, K. Torrefaction: a sustainable method for transforming of agri-waste to high energy density solids (biocoal). **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v.19, n.463-488. 2020.

OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M. A. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.158. 2022.

OLIVEIRA, L.M.F.; CARNEIRO, R. Políticas públicas e geração de energia através da biomassa dos resíduos sólidos no Brasil. **Energia na Agricultura**, v.35, n.3. 2020.

OLIVEIRA, C.Y.B.; JACOB, A.; NADER, C.; OLIVEIRA, C.D.L.; MATOS, A.P.; Evando S. ARAÚJO, E.S.; SHABNAM, N.; ASHOK, B.; GÁLVEZ, A.O. An overview on microalgae as renewable resources for meeting sustainable development goals. **Journal of Environmental Management**, v. 320, p.1-14. 2022.

ÖZEL, C.; BOGOÇLU, M.E.; KEÇECILER, C.; KAPLAN, E.; YÜCEL, S. Utilization of the simulated flue gas on the cultivation of *Chlorella protothecoides*. **Journal of the Indian Society**, v.96, n. ICNTC-2019 Special Issue, p.1137-1142. 2019.

PARK, S.; AHN, Y.; PANDI, K.; JI, M.K.; YUN, H.S.; CHOI, J.Y. Microalgae cultivation in pilot scale for biomass production using exhaust gas from power plants. **Energies**, v.12, n.18, p.3497. 2019.

PENLOGLOU, G.; PAVLOU, A.; KIPARISSIDES, C. Recent Advancements in Photo-Bioreactors for Microalgae Cultivation: A Brief Overview. **Processes**, v. 12, n. 6, p. 1104. 2024.

- PEREA-MORENO, M-A.; SAMERÓN-MANZANO, E.; PEREA-MORENO, A-J. Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends. **Sustainability**, v.11, n.3, p.863.2019.
- PEREIRA, S.; COSTA, A.S.V.; BARBOSA, S.; LAIA, M.L. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar Acadêmico**, v.19, n2, p.557. 2021.
- PIRES, J.C.M.; ALVIM-FERRAZ, M.C.M.; MARTINS, F.G.; SIMÕES, M. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p.3043-3053. 2012.
- PINA, L. C. C.; LIRA, E. B.; COSTA, M. H. J.; PEREIRA, D. A.; VARANDAS, R. C. R.; ALMEIDA, P. M. Avaliação de um sistema de cultivo de microalgas com um mix de fotobiorreatores tubular e de placas paralelas, para produção de biomassa de microalgas em meios de cultura alternativos. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n.4, p. 37734-37777. 2021.
- PRIYADARSHANI, I.; RATH, B. Commercial and industrial applications of microalgae – A review. **Journal of Algal Biomass Utilization**, v.3, n.4, p.89–100. 2012.
- PURI, L.; HU, Y.; NATERER, G. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. **Frontiers in Fuels**, v.2, n. 1378361, p. 1-19.2024.
- PROTIĆ, M.; MILTOJEVIĆ, A.; ZORAJA, B.; RAOS, M.; KRSTIĆ, I. Application of thermogravimetry for determination of carbon content in biomass ash as an indicator of the efficiency of the combustion process. **Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette**, v.28, p.1762-1768. 2021.
- RACERO-GALARAGA, D.A.; RHENALS-JULIO, J.D.; SOFÁN-GERMAN, S.J.; MENDONZA, J.M.; BULA-SILVERA, A. Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. **Results in Chemistry**, v.12. p.101886. 2024.
- RAMACHANDRA, T. V.; BHARATH, H. A.; KULKARNI, G.; HAN, S. S. Municipal solid waste: Generation, composition and GHG emissions in Bangalore, India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1122-1136. 2018.
- RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M.F.M.; BRASIL, A.C.M.; CRUZ, D.O.A.; GUERRA, D.R.A.; MACÊDO, E.N.; ICHIHARA, J.A. Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: **Ministério de Minas e Energia**, 2008. 193 p. ISBN 978-85-98341-05-7.

RINGSMUTH, A. K.; LANDSBERG, M. J.; HANKAMER, B. Can photosynthesis enable a global transition from fossil fuels to solar fuels, to mitigate climate change and fuel-supply limitations?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 134-163. 2016.

RUIZ, E.C.Z.; FIGUEIREDO FILHO, A.; BEHLING, A.; GUIMARÃES, F.A.R.; ABREU NETO, R. Bioenergy use of Araucaria angustifolia branches. **Bioenergy and Biomass**, v.153, n.106212. 2021.

SÁEZ-PLAZA, P.; NAVAS, M. J.; WYBRANIEC, S.; MICHAŁOWSKI, T.; ASUERO, A. G. An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v.43, n.4, p.224–272. 2013.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorefinaria: Cana-de-açúcar e Espécies Florestais**. Viçosa: UFV, p.551. 2013.

SANTOS, B.; CORRÊA, D.O.; SELESU, N.F.H.; KAVA, V.M.; MARIANO, A.B.; VARGAS, J.V.C. (2021). Produção de biomassa microalgal em escala: desafios e oportunidades. In: Severo, I. A.; Nascimento, T. C.; Fagundes, M. B. (eds) *Microalgas: potenciais aplicações e desafios*. Merida Publishers, <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1.c1>.

SATYANARAYANA, K. G.; MARIANO, A. B.; VARGAS, J. V. C. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. **International Journal of Energy Research**, v.35, p.291-311. 2011.

SCHERER, M. D.; PEREIRA, M. C.; MARIANO, A. B.; VARGAS, J. V. C. Avaliação da eficiência de floculação e ambiental: a recuperação da biomassa de microalgas cultivadas em fotobiorreatores compactos industriais. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v.5, n.1, p. 92-118. 2016.

SCHALLER, J.; TURNER, B.L.; WEISSFLOG, A.; PINO, D.; BIELNICKA, A.W.; ENGELBRECHT, B.M.J. Silicon in tropical forests: large variation across soils and leaves suggests ecological significance. **Biogeochemistry**, v.140, p.161– 174. 2018.

SCHIRMER, W. N.; FERREIRA, I. T. M.; RIBEIRO, C. B.; PAVANELLO, G. P.; MACHADO, G. O.; RODRIGUES, P. R. P. Caracterização de biomassa residual de fábrica de papel-cartão para aproveitamento energético. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v.10, n.4, p.1113-1132. 2017.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; MOREIRA, M. A. C.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Análise de ciclo de vida de processos e produtos baseados em microalgas. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). **Microalgas: potenciais aplicações e desafios**. Merida Publishers, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1>.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; MOREIRA, M. A. C.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Microalgae bio-technological for energy resources in industrial facilities - a review. In: **26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, 22-26 nov. 2021, Florianópolis, SC, Brazil. Florianópolis: ABCM, 2021.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; SEVERO, I. A. Energy recovery from nuisance algae blooms and residues. In: ABOMOHR, A. E. F.; WANG, Q.; HUANG, J. (eds). **Waste-to-Energy**. Cham: Springer, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91570-4_11.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; TAHER, D. M.; LANGER, M.; FERRAZ, F. A.; BALMANT, W.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Energy generation in Rankine cycle power plant from the incineration of forest residues. In: **27th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, 04-08 dez. 2023, Florianópolis, SC, Brazil. Florianópolis: ABCM, 2023

SCOCULI-DE-LIRA, G.; SERTORI, F.N.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B.; SEVERO, I.A. Alginate Extraction from Natural Resources Based on Legal Requirements: An Incentive for Sustainable Development. In: SEVERO, Ihana Aguiar; MARIANO, André Bellin; VARGAS, José Viriato Coelho (Eds.). **Alginate - Applications and Future Perspectives**. Rijeka: IntechOpen, 2024. Cap. 8. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.114217>.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; TAHER, D.M.; COSTA, I.G.; GUIMARÃES, M.M.; ZATTONI, I.F.; MARTINS, L. S.; VARGAS, J. V. C.; FERRAZ, F. A.; LANGER, M.; MARIANO, A. B. Use of forest residues: a process of energy generation and high-value biomaterials evaluation. **Proceedings of the 20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2024)**, Foz do Iguaçu, November 10-14, 2024. Aceito para publicação.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R.S.R.; TAHER, D.M; LANGER, M.; FERRAZ, F.A.; BALMANT, W.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A. B. Innovative energy solution: sustainable energy generation via forestry waste incineration in Rankine cycle power plant. **RETERM -Thermal Engineering**, v.23, n.1, p.43-52. 2024.

SEVERO, I.A.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; AMBATI, R.R.; GOKARE, R.A.; VARGAS, J.V.C.; ORDNEZ, J.; MARIANO, A.B. Disruptive potential of microalgae proteins: Shaping the future of the food industry. **Future Foods**, v.9, n. 100318, p. 1-15. 2024.

SETTE JR., C.R.; MORAES, M.D.A.; CONEGLIAN, A.; ROBEIRO, R.M.; HANSTED, A.L.S.; YAMAJI, F.M. Forest Harvest byproducts: Use of waste as energy. **Waste Management**, v.114, p.196-201. 2020.

SHARMA, B.; VAISH, B.; MONIKA; SINGH, U K.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Recycling of Organic Wastes in Agriculture: An Environmental Perspective. **International Journal of Environmental Research**, v.13, p.409–429. 2019).

SIEDENBURG, J. Could microalgae offer promising options for climate action via their agri-food applications? **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v.6, n.976946, p.1-20. 2022.

SINGH, K. Greenhouse gases and their impact on global warming. AND THEIR IMPACT ON GLOBAL WARMING. **International Journal of Multidisciplinary Education Research**, v.13, n.4. p.62-68. 2024.

SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M.; FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influence of temperature and heating rates on mechanical resistance, density and yield of the wood charcoal of *Eucalyptus cloeziana*. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 8, n.2, p. 82–94. 2017.

SINHA, A.; GOSWAMI, G.; KUMAR, R.; DAS, D. A microalgal biorefinery approach for bioactive molecules, biofuel, and biofertilizer using a novel carbon dioxide-tolerant strain *Tetradismus obliquus* CT02. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.13, n.47. 2021.

SILVA, S.P.; COSTA, A.S.V.; SANTOS, S.L.B.; LAIA, M.L. A importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Revista Pensar Acadêmico**, v.19, n.2, 2021.

SILVA, C. L.; FUGII, G. M.; SANTOYO, A. H. Proposta de um modelo de avaliação das ações do poder público municipal perante as políticas de gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: um estudo aplicado ao município de Curitiba. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.9, n.2. 2017.

SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; ZATTA, P. H. S.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I. A.; MARIANO, A. B. Matrizes poliméricas para imobilização de microalgas aplicadas ao tratamento de efluentes: uma análise de prospecção tecnológica de patentes. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). **Microalgas: potenciais aplicações e desafios**. Merida Publishers, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1>.

SOLEH, M.; AHMAD, A.H.; JUANGSA, F.B.; DARMANTO, P.S.; PASEK, A.D. Impact of different kinds of biomass mixtures on combustion performance, interaction and synergistic effects in cofiring of coal and biomass in steam power plants. **Clean Energy**, v.7, n.5, p.1136-1147. 2023.

SOUST-VERDAGUER, B.; LLATAS, C.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Critical review of bim-based LCA method to buildings. *Energy and Buildings*, v.136, p.110-120. 2017.

SPARACINO, E.; BOLOGNI, E.; ROSSI, A.; AGOSTINELLI, C.; MADEO, D.; MOCENNI, C. An integrated model for supporting aware decisions of companies in a circular and sustainable economy transition. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management**, v.8, n.3, p.705-714. 2021.

SPEIGHT, J. G. Combustion of hydrocarbons. In: *Handbook of industrial hydrocarbon processes*. Oxford: Elsevier, 2011. cap. 10, p. 355–393. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8632-7.10010-6>. Acesso em: 03 mar. 2025

ST'AHIEL, R. Sustainable development in the shadow of climate change. **Civitas**, v.19, n.2, p.337-353. 2019.

TAHER, D. M. **Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suíno biodigeridos**. 2013. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-

Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/33836>. Acesso em: 20 out. 2023.

TAHER, D.M. **Validação experimental e otimização de um modelo matemático de sistema de fixação de emissões por cultivo de microalgas em fotobiorreatores industriais**. 2019. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/65690>. Acesso em: 20 out. 2023.

TAHER, D.M.; JACOB-FURLAN, B.; ANTEZANA, V.C.P.; GALARCE, L.S.; VIEIRA FILHO, R.X.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B. Microalgas como agentes de biorremediação Ambiental. In: **Microalgas: Potenciais aplicações e desafios**. Canoas: Merida Publishers, 2021. Capítulo 6, p. 151-169.

TEMPLETON, D.W.; LAURENS, L.M.L. Nitrogen-to-protein conversion factors revised for applications of microalgal biomass conversion to food, feed and fuel. **Algal Research**, v.11, p.359-367. 2015.

TITUS, B.D.; BROWN, K.; HELMISAARI, H.S.; VANGUELOVA, E.; STUPAK, I.; EVANS, A.; CLARKE, N.; GUIDI, C.; BRUCKMAN, V.J.; KABASINSKIENE, I.V.; ARMOLAITIS, K.; VRIES, W.; HIRAI, K.; KAARAKKA, L.; HOGG, K.; REECE, P. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. **Energy, Sustainability and Society**, v.11, n.10. 2021.

TSAI, W-T.; LIN, Y-Q.; TSAI, C-H.; CHUNG, M-H.; CHU, M-H.; HUANG, H-J.; JAO, Y-H.; YEH, S-I. Conversion of water caltrop husk into torrefied biomass by torrefaction. **Energy**, v.195, n.116967, p.1-6. 2020.

URNS, Stephen R. An introduction to combustion: concepts and applications. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. 732 p. ISBN 978-0-07-338019-3.

UNITED NATIONS: CLIMATE CHANGE ACTION. What is climate change? Disponível em: < <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

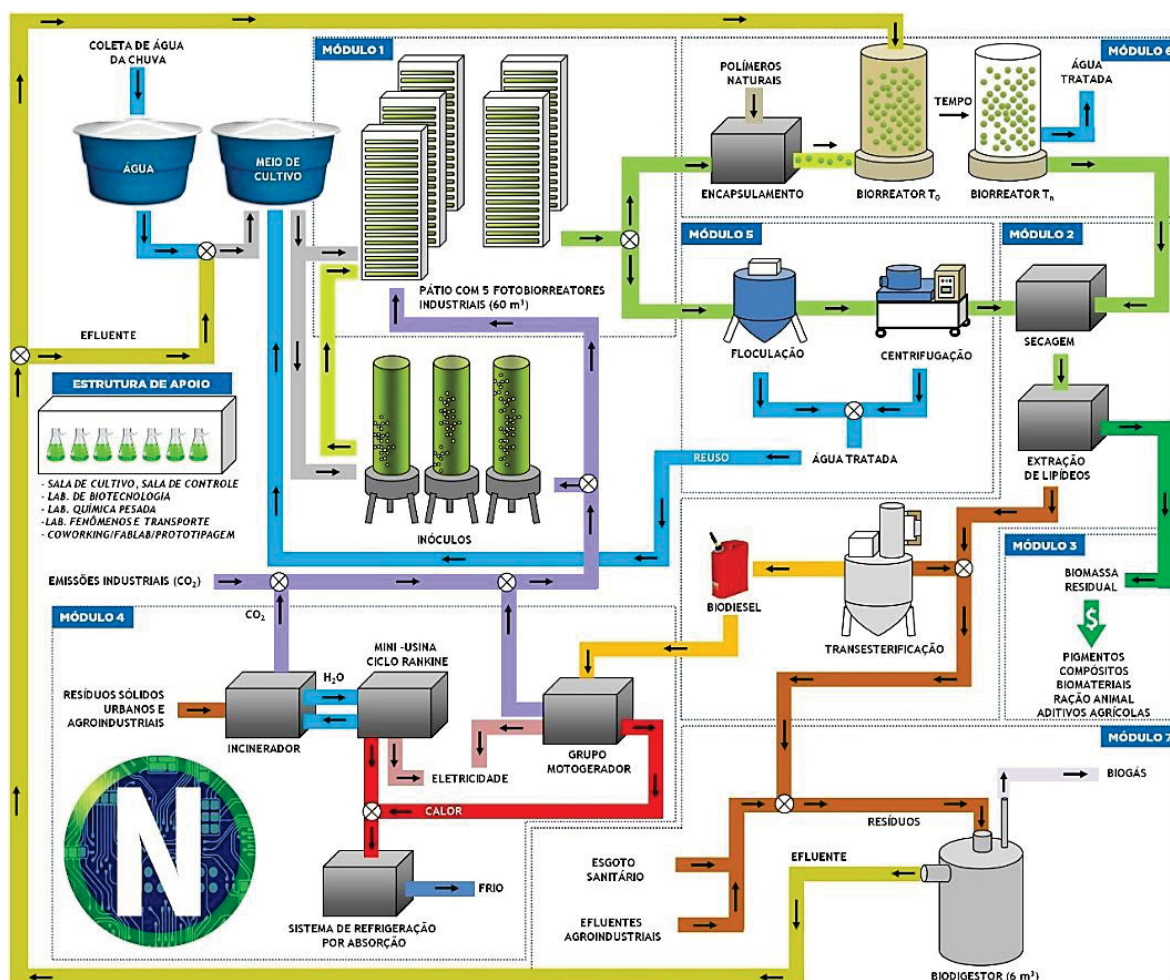
UNITED NATIONS: GLOBAL COMPACT. **PACTO GLOBAL – REDE BRASIL**. Disponível em: < <https://www.pactoglobal.org.br/pg/esg>>. Acesso em: 10 de junho de 2022.

- VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; CORRÊA, D. O.; ORDONEZ, J. C. The microalgae derived hydrogen process in compact photobioreactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.39, p.958-9598. 2014.
- VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K.; VASSILEVA, C.G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v.89, p.913-933. 2010.
- VLADIĆ, J.; JAZIĆ, J.M.; FERREIRA, A.; MALETIĆ, S.; CVETKOVIĆ, D.; AGBABA, J.; VIDOVIĆ, S.; GOUVEIA, L. Application of Green Technology to Extract Clean and Safe Bioactive Compounds from *Tetradismus obliquus* Biomass Growth in Poultry Wastewater. **Molecules**, v.28, n.5, p.2397. 2023.
- VLASKIN, M.S.; KISELEVA, S.V.; CHERNOVA, N.I.; GRIGORENKO, A.V.; RYNDIN, K.G.; POPEL', O.S.; MALANI, S.Ya.; SLAVKINA, O.V.; NAVES, F.F.; KUMAR, V. Effectiveness of CO₂ capture by *Arthospira platensis* microalgae from a mixture simulating flue gases. **Thermal Engineering**, v.70, p.370-383. 2023.
- WANG, Y.; TIBBETTS, S.M.; MCGINN, P. Microalgae as source of high-quality protein for human food and protein supplements. **Foods**, v.10, n.12, p.3002. 2021.
- WATANABE, Y.; HALL, D. Photosynthetic CO₂ conversion technologies using a photobioreactor incorporating microalgae - energy and material balances -. **Energy Conversion and Management**, v.37, n. 6-8, p. 1321-1326. 1996.
- WATZLAWICK, L.F.; WIONZEK, F.B.; SILVA, S.V.K.; BENIN, C.C. Produção de biomassa e propriedades energéticas do *Eucalyptus benthamii* maiden et cambage. **ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA: TECNOLOGIA, PESQUISA E TENDÊNCIAS**. Vol. 1. Editora Científica Digital, 2020.
- WEI, Q.; YAO, J.; CHEN, R.; YANG, S.; TANG, Y.; MA, X. Low-frequency ultrasound and nitrogen limitation induced enhancement in biomass production and lipid accumulation of *Tetradismus obliquus* FACHB-12. **Biosource Technology**, v.358, p. 127387. 2022.
- XU, Y.; TONG, X.; LU, Y.; LU, Y.; WANG, X.; HAN, J.; LIU, Z.; DING, J.; MUMBY, W.; PENG, Y.; SUN, Q. Microalgal proteins: Unveiling sustainable alternatives to address the protein challenge. **International Journal of Biological Macromolecules**, v.276, Part 2, p.133747. 2024.
- XUYANG, L.; YAN, Y.; JIHUI, F.; YINGZI, C.; XIAODAN, W. Dynamics of above-and below-ground biomass and C, N, P accumulation in the Alpie Steppe of Northern Tibet. **Journal of Mountain Science**, v.8, p. 838-844. 2011.

- ZAHARIEVA, M. M.; DIMITRINA, Z.D.; SNEZHANA, R.V.; ILIEVA, Y.; BRACHKOVA, A.; BALABANOVA, V.; GEVRENOVA, R.; KIM, T.C.; KALEVA, M.; GEORGIEVA A.; MILEVA, M.; YONCHEVA, K.; BENBASSAT, N.; NAJDENSKI, H.; KROUMOV, A.D. Antimicrobial and antioxidant potential of *Scenedesmus obliquus* microalgae in the context of integral biorefinery concept. **Molecules**, v. 27, n. 2, p.519. 2022.
- ZAKARIA, Y.; SUKARNI, S.; PUSPITARI, P.; MUFTI, N. Investigate the Potential Renewable Energy of Microalgae *Spirulina* sp Using Proximate Analyser, SEM-EDX, and Thermogravimetry. **Journal of Mechanical Engineering Science and Technology**, v.6, n.2, p.66. 2022.
- ZHAO, B.; SU, Y.; ZHANG, Y.; CUI, G. Carbon dioxide fixation and biomass production from combustion flue gas using energy microalgae. **Energy**, v. 89, p.347-357. 2015.
- ZHENG, X.; STREIMIKIENE, D.; BALEZENTIS, T.; MARDANI, A. CAVALLARO, F.; LIAO, H. A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts the key climate change players. **Journal of Cleaner Production**, v.234, p.1113-1133. 2019.

APÊNDICE A – LAYOUT DOS PROCESSOS INTEGRADOS DESENVOLVIDOS NO NPDEAS

PROCESSOS INTEGRADOS DIVIDIDOS POR MÓDULOS

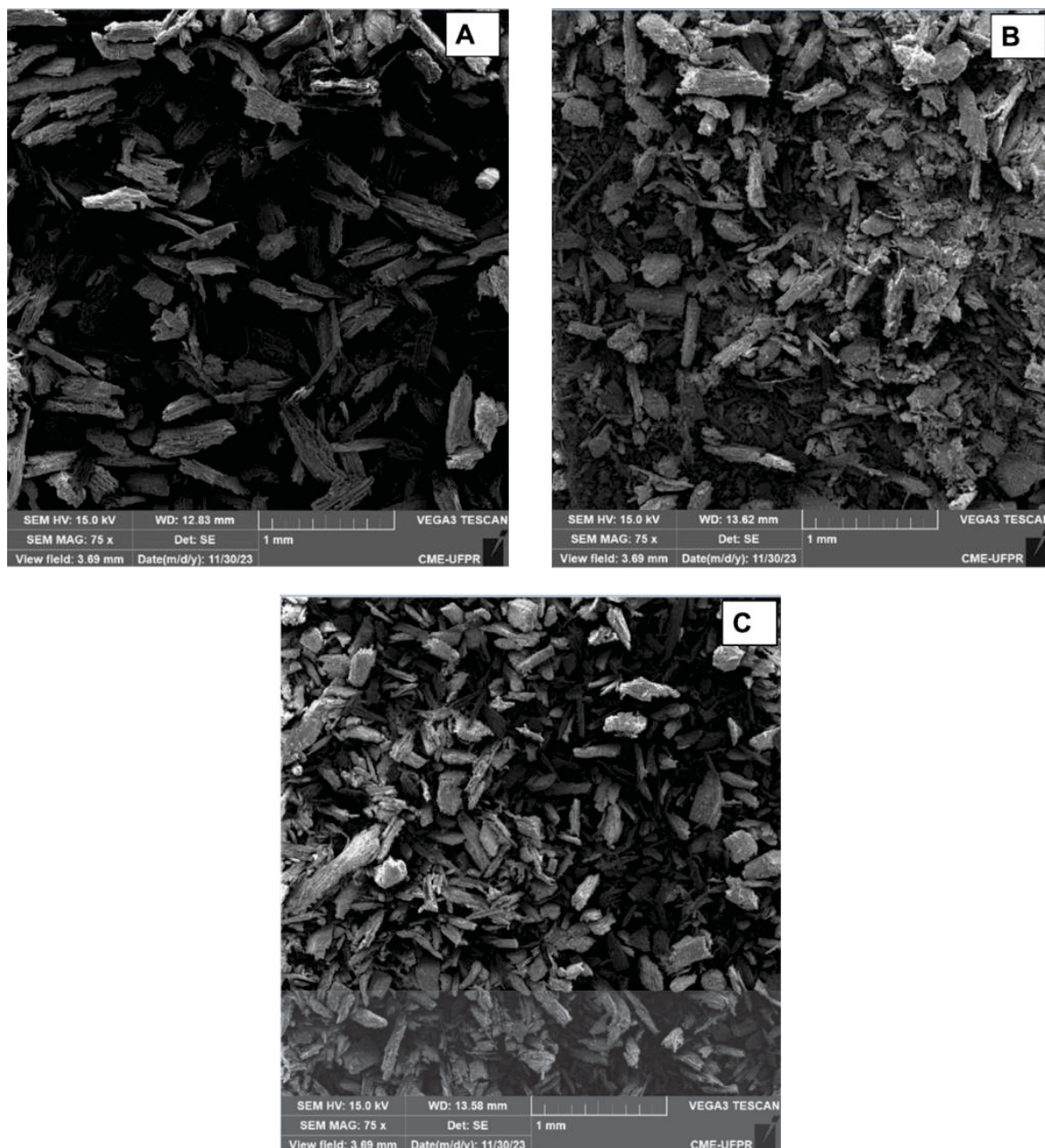


LEGENDA: Módulo 1: cultivo de microalgas em FBR; Módulo 2: processamento primário das microalgas (floculação, centrifugação e secagem); Módulo 3: processamento da biomassa residual; Módulo 4: geração de energia e tratamento de resíduos; Módulo 5: produção de biocombustível por transesterificação; Módulo 6: tratamento de água; Módulo 7: biodigestão (tratamento de efluentes em biodigestor).

FONTE: Adaptado de Satyanarayana, Mariano, Vargas, (2011).

APÊNDICE B – IMAGENS DE MEV – ANÁLISE MORFOLÓGICA DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE RESÍDUOS FLORESTAIS

ELETROMICROGRAFIA DOS 3 *BLENDS* DE RESÍDUOS FLORESTAIS

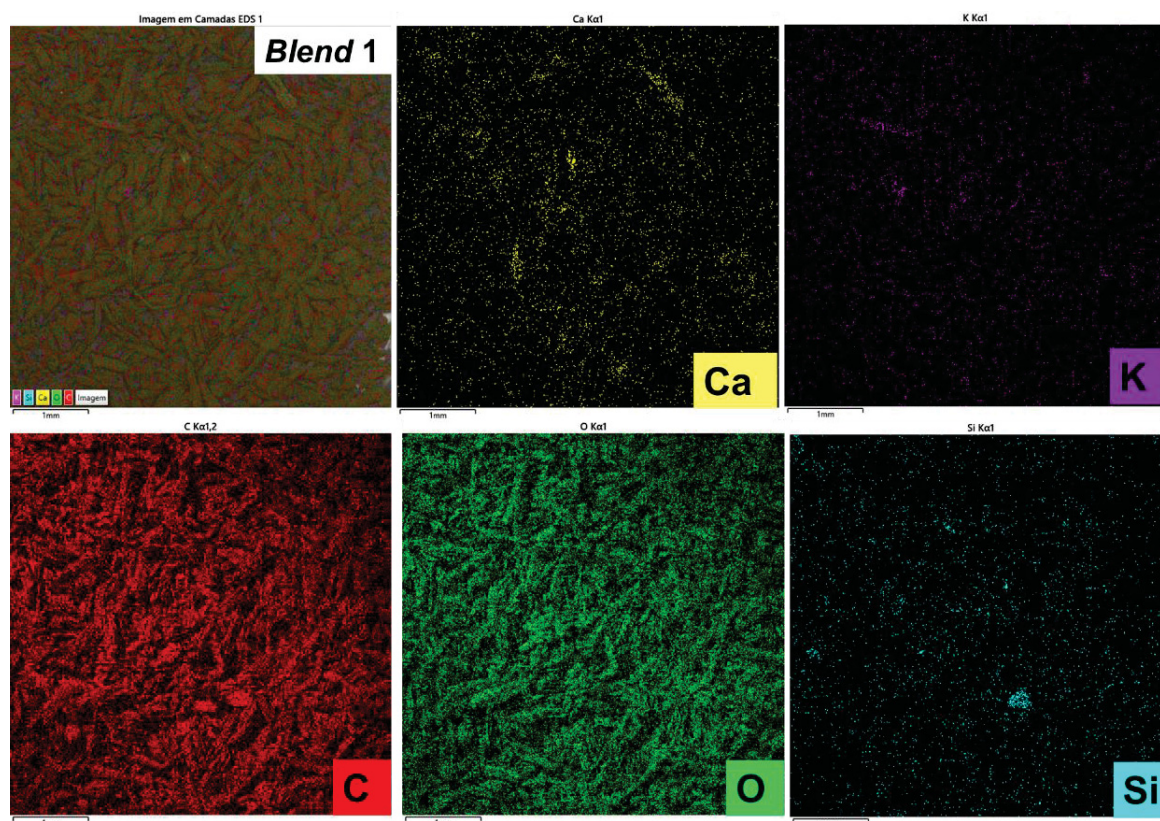


LEGENDA: A – *Blend 1*; B – *Blend 2*; C – *Blend 3*.

FONTE: A autora (2023).

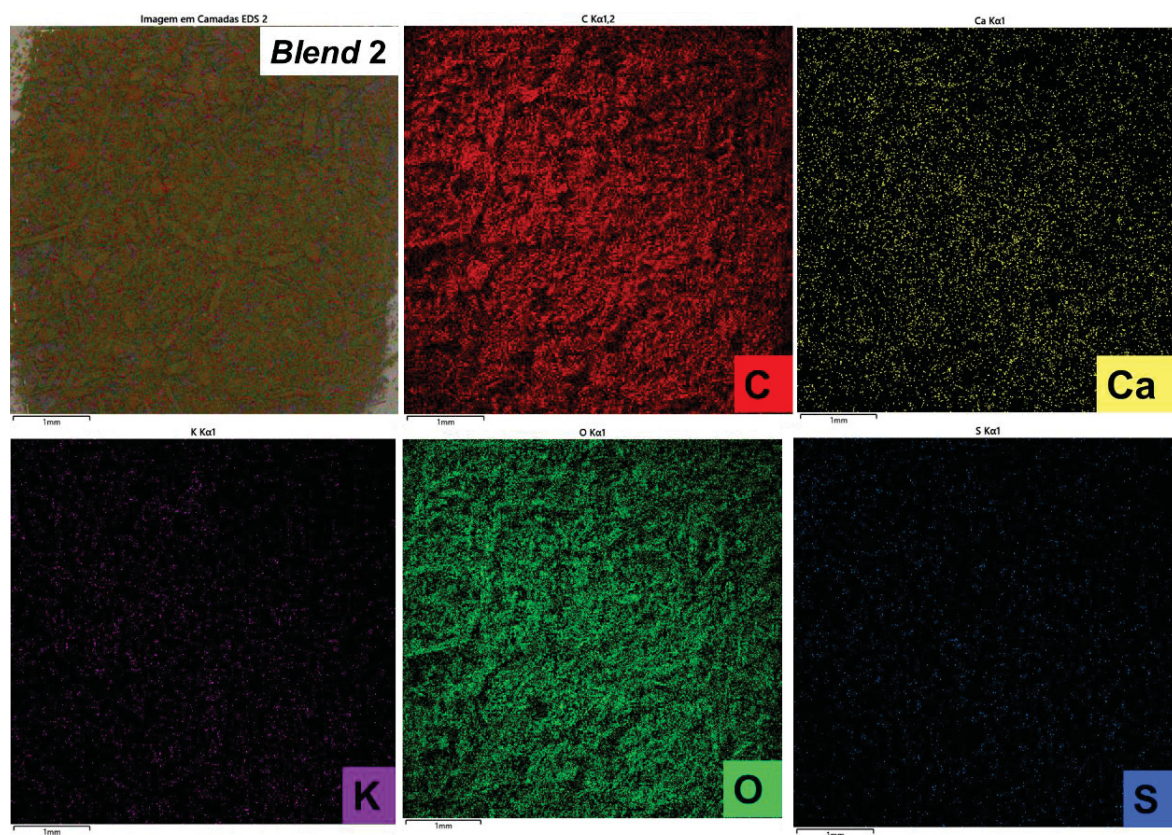
APÊNDICE C – IMAGENS DE EDS EM CAMADAS DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DOS *BLENDS* DE RESÍDUOS FLORESTIAS ANALISADOS

EDS EM CAMADAS DO *BLEND* 1



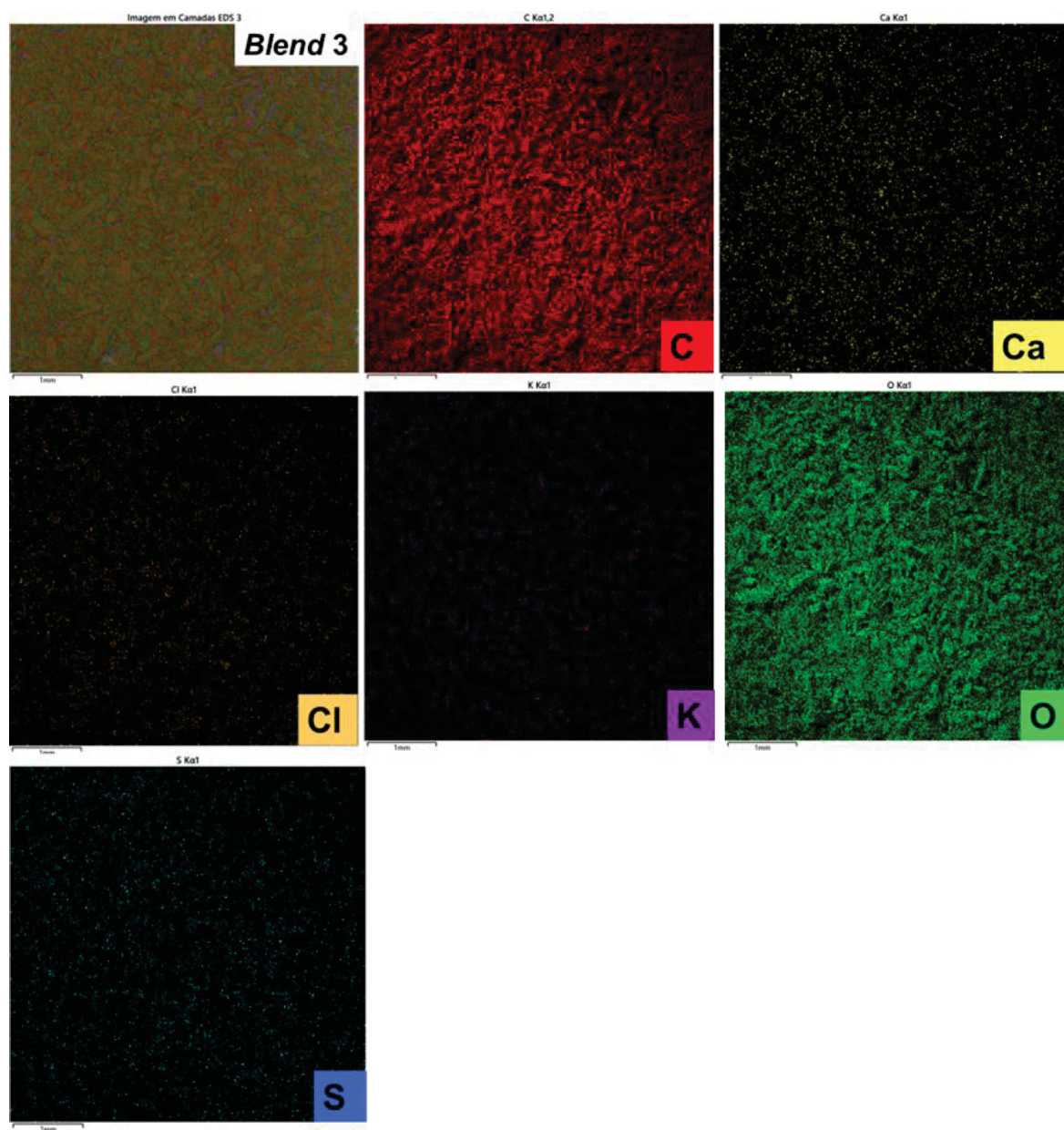
LEGENDA: *Blend* 1 – imagem EDS em camadas: Carbono (C) – 61,2%; Oxigênio (O) – 37,9%; Potássio (K) – 0,4%; Cálcio (Ca) – 0,3%; Silício (Si) – 0,2%.

FONTE: A autora (2023).

EDS EM CAMADAS DO *BLEND 2*

LEGENDA: *Blend 2*– imagem EDS em camadas: Carbono (C) – 57,8%; Oxigênio (O) – 39,4%; Cálcio (Ca) – 2,3%; Potássio (K) – 0,4%; Enxofre (S) – 0,2%.

FONTE: A autora (2023).

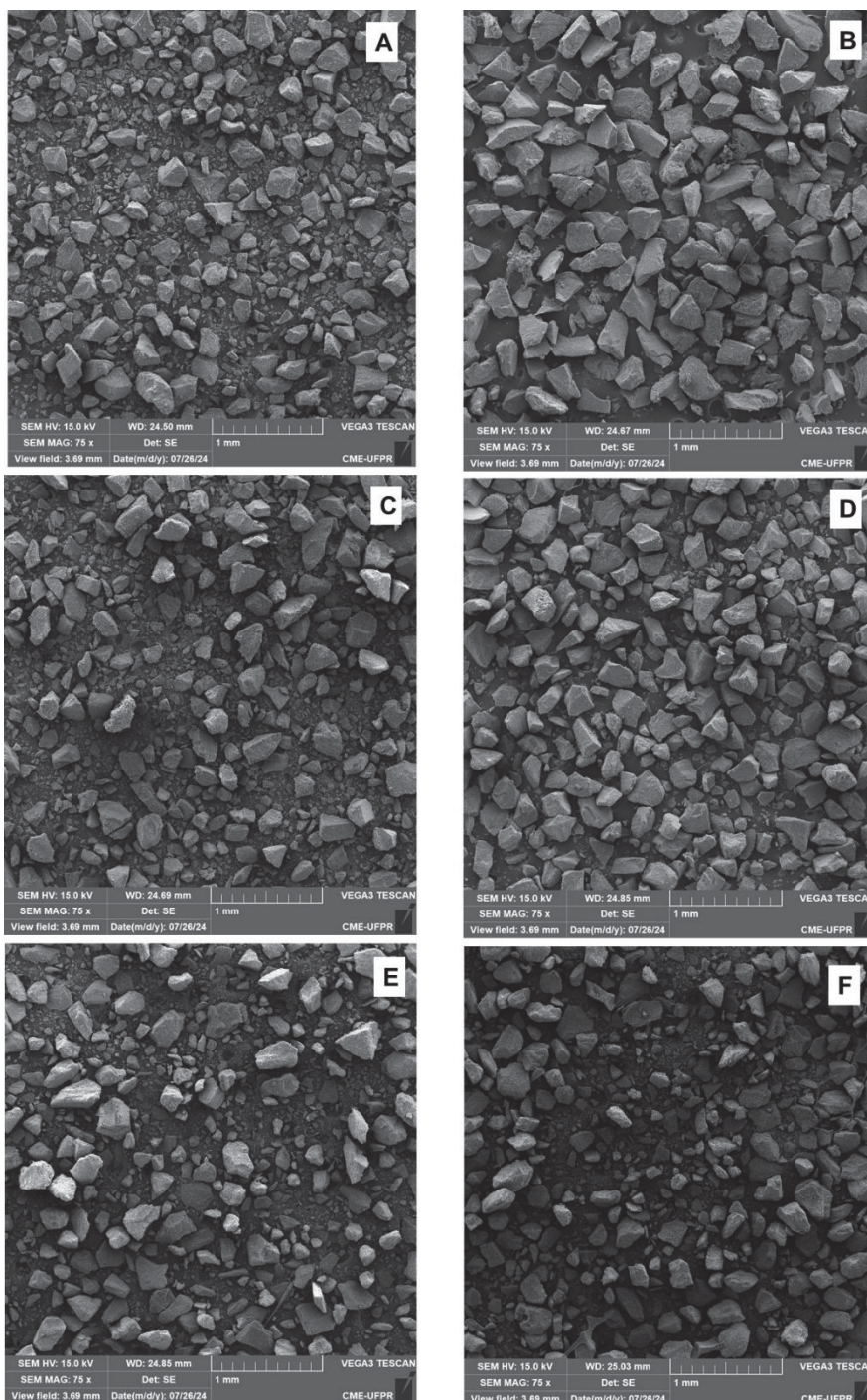
EDS EM CAMADAS DO *BLEND 3*

LEGENDA: *Blend 3* – imagem EDS em camadas: Carbono (C) – 61,9%; Oxigênio (O) – 37,7%; Cálcio (Ca) – 0,1%; Cloro (Cl) – 0,1%; Potássio (K) – 0,1%; Enxofre (S) – 0,1%.

FONTE: A autora (2023).

APÊNDICE D – IMAGENS DE MEV – ANÁLISE MORFOLÓGICA DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS

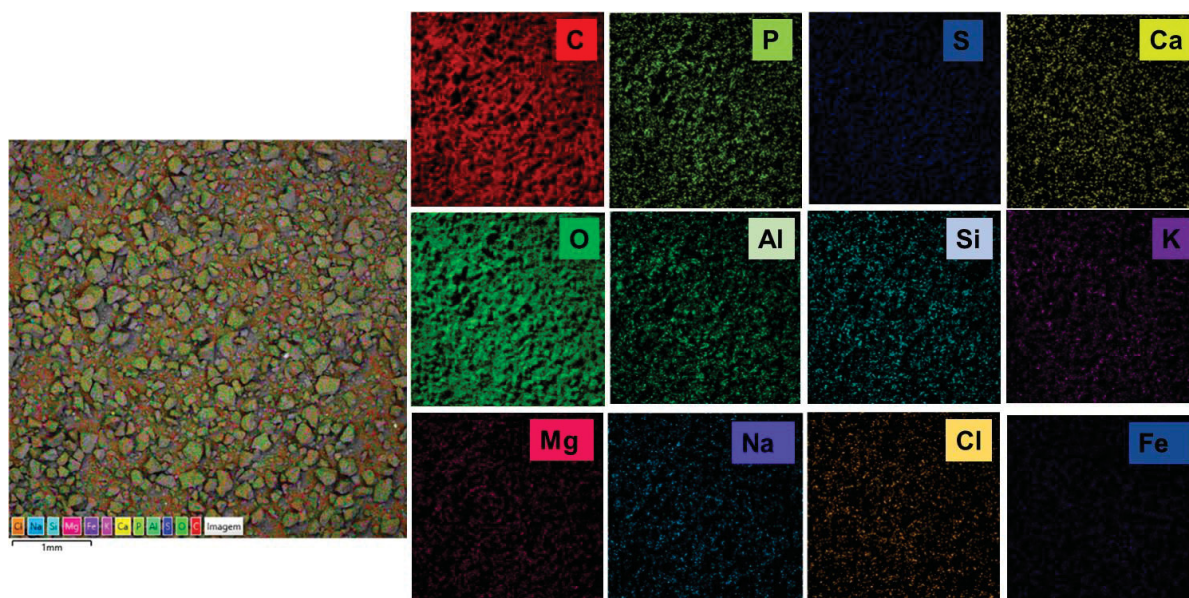
ELETROMICROGRAFIA DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS



LEGENDA: A – Biomassa seca bruta (dejetto) 2018; B – Biomassa seca residual (dejetto) 2018; C – Biomassa seca bruta (dejetto) 2023; D – Biomassa seca residual (dejetto) 2023; E – Biomassa seca bruta (CHU) 2023; F – Biomassa seca residual (CHU) 2023.
FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE E – IMAGENS DE EDS EM CAMADAS DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA SECA DE MICROALGAS ANALISADAS

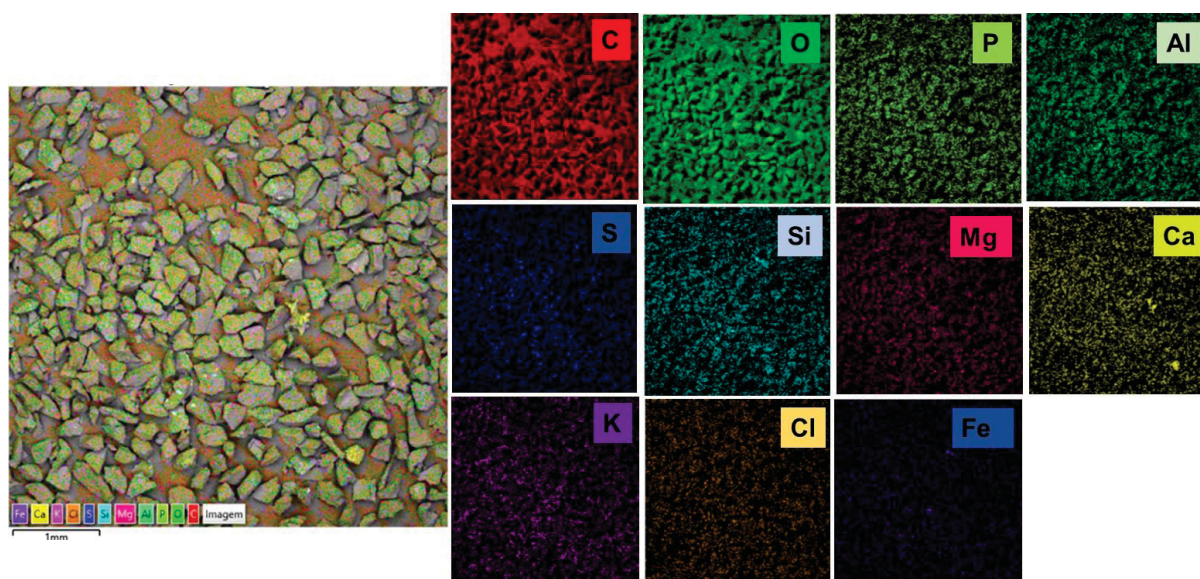
MEV-EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA BRUTA – DEJETO – 2018



LEGENDA: Carbono (C) – 68,2%; Oxigênio (O) – 26,8%; Fósforo (P) – 1,4%; Cálcio (Ca) – 0,9%; Ferro (Fe) – 0,7%; Alumínio (Al) – 0,6%; Enxofre (S) – 0,6%; Silício (Si) – 0,3; Potássio (K) – 0,2; Magnésio (Mg) – 0,1%; Cloro (Cl) – 0,1%; Sódio (Na) – 0,1%.

FONTE: A autora (2024).

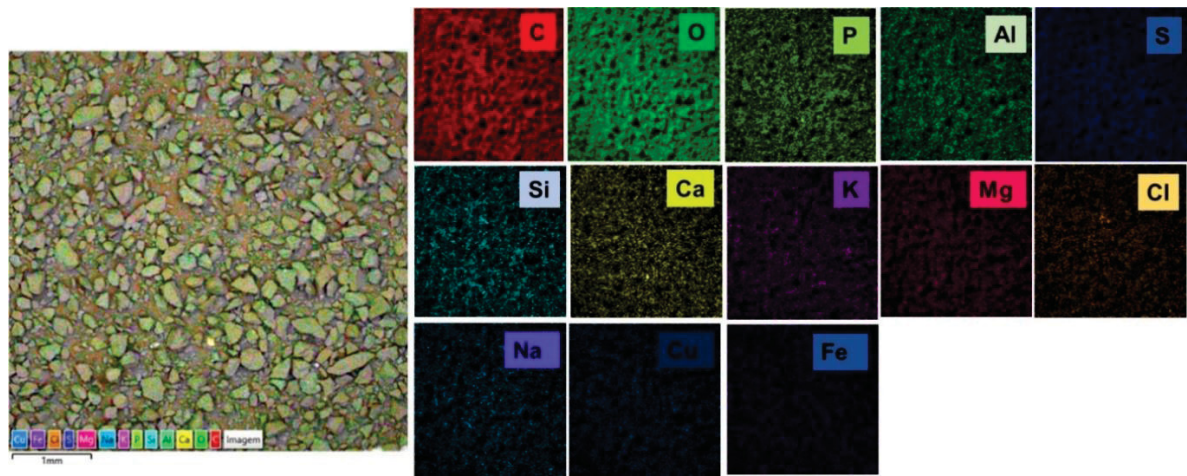
EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA RESIDUAL – DEJETO– 2018



LEGENDA: Carbono (C) – 70,2%; Oxigênio (O) – 25,3%; Fósforo (P) – 1,1%; Enxofre (S) – 0,9%; Cálcio (Ca) – 0,6%; Alumínio (Al) – 0,5%; Potássio (K) – 0,5; Ferro (Fe) – 0,3%; Magnésio (Mg) – 0,2%; Silício (Si) – 0,2%; Cloro (Cl) – 0,1%

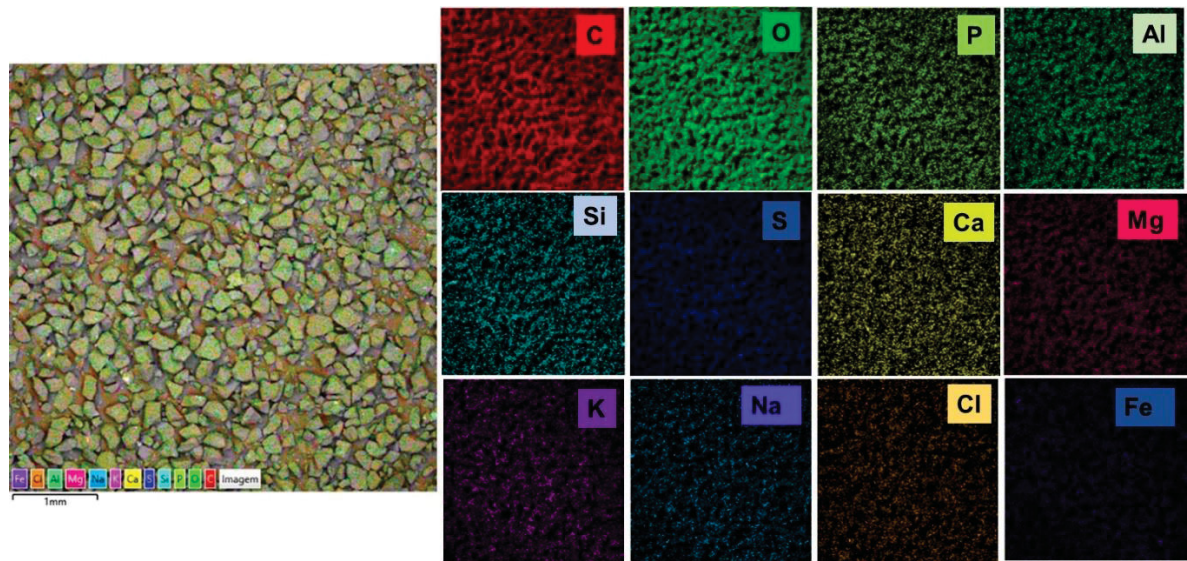
FONTE: A autora (2024).

EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA BRUTA – DEJETO – 2023



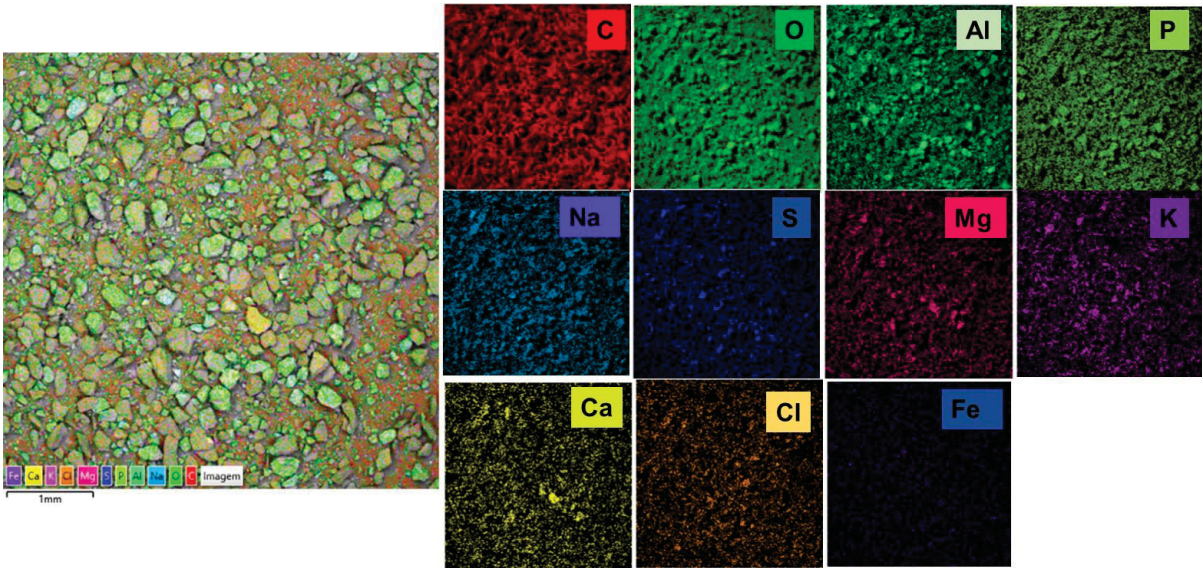
LEGENDA: Carbono (C) – 69,4%; Oxigênio (O) – 25,5%; Fósforo (P) – 1,0%; Alumínio (Al) – 0,8%; Enxofre (S) – 0,7%; Potássio (K) – 0,6%; Cálcio (Ca) – 0,5%; Ferro (Fe) – 0,5%; Silício (Si) – 0,5%; Magnésio (Mg) – 0,2%; Sódio (Na) – 0,1%; Cloro (Cl) – 0,1%; Cobre (Cu) – 0,1%.
 FONTE: A autora (2024).

EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA RESIDUAL – DEJETO – 2023



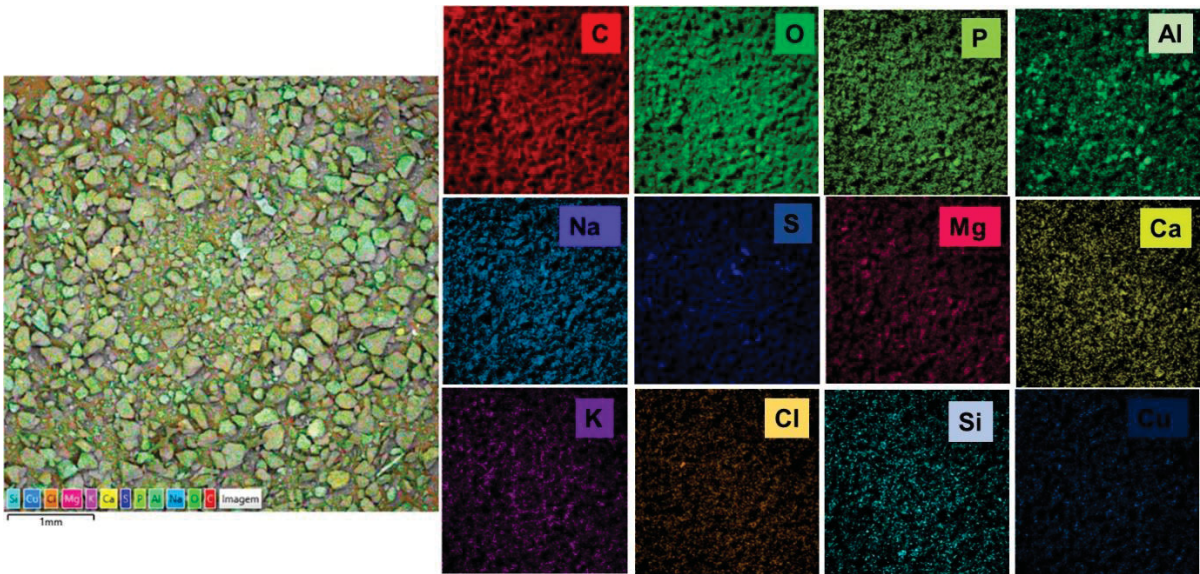
LEGENDA: Carbono (C) – 57,1%; Oxigênio (O) – 29,1%; Silício (Si) – 4,3%; Alumínio (Al) – 3,8%; Potássio (K) – 1,5%; Cálcio (Ca) – 1,2%; Fósforo (P) – 1,1%; Ferro (Fe) – 0,8%; Enxofre (S) – 0,5%; Magnésio (Mg) – 0,3%; Sódio (Na) – 0,2%; Cloro (Cl) – 0,2%.
 FONTE: A autora (2024).

EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA BRUTA – CHU – 2023



LEGENDA: Carbono (C) – 53,7%; Oxigênio (O) – 33,1%; Sódio (Na) – 4,1%; Fósforo (P) – 2,0%; Alumínio (Al) – 2,0%; Potássio (K) – 1,9%; Enxofre (S) – 1,4%; Cloro (Cl) – 0,8%; Cálcio (Ca) – 0,7%; Magnésio (Mg) – 0,3%; Silício (Si) – 0,1%.
 FONTE: A autora (2024).

EDS EM CAMADAS DA BIOMASSA SECA RESIDUAL – CHU – 2023



LEGENDA: Carbono (C) – 58,9%; Oxigênio (O) – 33,0%; Sódio (Na) – 2,2%; Fósforo (P) – 2,1%; Alumínio (Al) – 1,3%; Enxofre (S) – 0,7%; Cálcio (Ca) – 0,6%; Potássio (K) – 0,5%; Magnésio (Mg) – 0,4%; Silício (Si) – 0,1%; Cloro (Cl) – 0,1%; Cobre (Cu) – 0,1%.
 FONTE: A autora (2024).

APÊNDICE F – TABELA COM OS DESTAQUES PUBLICADOS AO LONGO DA TESE

TRABALHOS
JACOB-FURLAN, B.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I. A.; GONÇALVES, R. S. R.; MARTINS, L. S.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Imobilização de <i>Tetrademus obliquus</i> em matriz de alginato para biorremediação de efluentes. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). Microalgas: potenciais aplicações e desafios . Merida Publishers, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1 .
SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; ZATTA, P. H. S.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I. A.; MARIANO, A. B. Matrizes poliméricas para imobilização de microalgas aplicadas ao tratamento de efluentes: uma análise de prospecção tecnológica de patentes. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). Microalgas: potenciais aplicações e desafios . Merida Publishers, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1 .
SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; MOREIRA, M. A. C.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Análise de ciclo de vida de processos e produtos baseados em microalgas. In: SEVERO, I. A.; NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B. (eds). Microalgas: potenciais aplicações e desafios . Merida Publishers, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-8-1 .
SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; SILVEIRA-DA-SILVA, P. A.; MOREIRA, M. A. C.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Microalgae bio-technological for energy resources in industrial facilities - a review. In: 26th ABCM International Congress of Mechanical Engineering , 22-26 nov. 2021, Florianópolis, SC, Brazil. Florianópolis: ABCM, 2021.
SCOCULI-DE-LIRA, G.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B.; SEVERO, I. A. Energy recovery from nuisance algae blooms and residues. In: ABOMOHR, A. E. F.; WANG, Q.; HUANG, J. (eds). Waste-to-Energy . Cham: Springer, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91570-4_11
SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R. S. R.; TAHER, D. M.; LANGER, M.; FERRAZ, F. A.; BALMANT, W.; VARGAS, J. V. C.; MARIANO, A. B. Energy generation in Rankine cycle power plant from the incineration of forest residues. In: 27th ABCM International Congress of Mechanical Engineering , 04-08 dez. 2023, Florianópolis, SC, Brazil. Florianópolis: ABCM, 2023
SCOCULI-DE-LIRA, G.; SERTORI, F.N.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B.; SEVERO, I.A. Alginate Extraction from Natural Resources Based on Legal Requirements: An Incentive for Sustainable Development. In: SEVERO, I. A.; AGUIAR, MARIANO, A.; VARGAS, J. (Eds.). Alginate - Applications and Future Perspectives . Rijeka: IntechOpen, 2024. Cap. 8. Disponível em: https://doi.org/10.5772/intechopen.114217 .
SEVERO, I.A.; SCOCULI-DE-LIRA, G.; AMBATI, R.R.; GOKARE, R.A.; VARGAS, J.C.C.; ORDONEZ, J.; MARIANO, A.B. Disruptive potential of microalgae proteins: Shaping the future of the food industry. Future Foods , v. 9, p. 100318, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100318 .
SCOCULI-DE-LIRA, G.; TAHER, D.M.; COSTA, I.G.; GUIMARÃES, M.M.; ZATTONI, I.F.; MARTINS, L. S.; VARGAS, J. V. C.; FERRAZ, F. A.; LANGER, M.; MARIANO, A. B. Use of forest residues: a process of energy generation and high-value biomaterials evaluation. Proceedings of the 20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2024) , Foz do Iguaçu, November 10-14, 2024. Aceito para publicação.
SCOCULI-DE-LIRA, G.; JACOB-FURLAN, B.; GONÇALVES, R.S.R.; TAHER, D.M.; LANGER, M.; FERRAZ, F.A.; BALMANT, W.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A. B. Innovative energy solution: sustainable energy generation via forestry waste incineration in Rankine cycle power plant. RETERM - Thermal Engineering , v.23, n1, p.43-52.2024.
SCOCULI-DE-LIRA, G.; TAHER, D.M.; GUIMARÃES, M.M.; ZATTONI, I.F.; COSTA, I.G.; MARTINS, L.S.; VARGAS, J.V.C.; FERRAZ, F.A.; LANGER, M.; MARIANO, A.B. Integrated energy recovery from forest residues and antioxidant evaluation of <i>Tetrademus obliquus</i> biomass. RETERM . Aceito para publicação.
SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I.A.; TAHER, D.M.; GUERRA, H.P.; FERRAZ, F.A.; MARTINS, L.S.; ORDONEZ, J.C.; VARGAS, J.V.C.; MARIANO, A.B. Energy Recovery from Forest Residues: Thermodynamic Modeling of a Rankine Cycle. Bioenergy Research . Aceito com correções: BERE-D-25-00215.

SCOCULI-DE-LIRA, G.; SEVERO, I.A.; FERRAZ, F.A.; COSTA, I.G.; GUIMARÃES, M.M.; ZATTONI, I.F.; BIANCHINI, L.F.; VARGAS, J.V.C.; TAHER, D.M.; MARIANO, A.B. Multiparametric Evaluation of *Tetrademus obliquus* Biomass: An Integrated Approach Including Antioxidant, Nutritional, and Energy Properties. **Microorganisms**, v.13, n.1583, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071583>

FONTE: A autora (2025).

ANEXO G – ENTENDENDO O SISTEMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS DA UFPR

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

Entendendo o sistema de gestão de resíduos
da UFPR/Curitiba

NOME *

.....

E-mail *

.....

Cargo/Função - Setor *

.....

1- Quais são os tipos de resíduos coletados nos campi da UFPR/ Curitiba? *

- ☒ Resíduos vegetais (podas em geral)
- ☒ Resíduos animais (oriundos do biotério)
- ☒ Resíduos comuns (sólidos recicláveis)
- ☒ Resíduos orgânicos e rejeitos
- ☒ Resíduos da construção civil
- ☒ Resíduos eletrônicos
- ☒ Resíduos de serviços de saúde
- ☒ Resíduos perigosos
- ☒ Outros não citados

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

Em caso de marcar "Outros não citados". Especificar o(s) tipo(s) de resíduo(s):

Resíduos de Saúde e resíduos químicos

2 - Quais são os volumes mensais aproximados para cada categoria de resíduo? *

- ☒ Não se aplica
- ☐ Não há possibilidade de mensuração/quantificação
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

Em caso de possibilidade de mensurar/quantificar, favor descrever:

Tipo de resíduo e quantidade (Kg)/mês

Irei enviar o levantamento em planilha

3 - Qual procedência dos resíduos coletados? *

- ☐ Somente do campus Centro Politécnico
- ☐ Todos os campi UFPR de Curitiba
- ☒ Todos os campi do Paraná
- ☐ Outros

Em caso de marcar "Outros". Especificar o local:

4 - Os resíduos provenientes dos diferentes campi são misturados? *

- ☐ SIM
- ☒ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

5 - Os resíduos provenientes dos diferentes campi são destinados a locais diferentes? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

Se sim, quais os locais de destinação. Especificar:

Rejeitos: prefeituras

Recicláveis: associações de reciclagem ou prefeituras

Resíduos de saúde, de construção civil e perigosos: empresas especializadas

8 - Os diferentes tipos de resíduos possuem diferentes locais de destinação? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

No caso de marcar "SIM", favor especificar:

Rejeitos: prefeituras

Recicláveis: associações de reciclagem ou prefeituras

Resíduos de saúde, de construção civil e perigosos: empresas especializadas

9 - Como é realizada a separação dos resíduos? *

- ☒ Separação/seleção dentro do campus
- ☐ Separação/seleção somente em relação aos resíduos recicláveis
- ☒ Separação seleção de acordo com o grau de periculosidade
- ☐ Outras formas de seleção/separação não especificadas anteriormente.

Em caso de marcar "Outras formas de seleção/separação não especificadas anteriormente". Descrever:

.....

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

6 - Como é realizado o processo de coleta dos resíduos? De acordo com: *

- ☐ Características físicas, químicas e biológicas
- ☐ Grau de periculosidade e/ou riscos envolvidos
- ☐ Estado físico
- ☐ Recicláveis ou não recicláveis
- ☐ Resíduos orgânicos
- ☐ Resíduos vegetais oriundos da manutenção arbórea do(s) campus(i)
- ☐ Resíduos animais oriundos do biotério
- ☐ Periculosidade
- ☐ Classe I e IIa e IIb
- ☒ Todas as opções
- ☐ Outros

Em caso de marcar "Outros". Especificar:

7 - A UFPR possui um sistema de pesagens, análise e avaliação de periculosidade dos resíduos? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

10 - No que diz respeito aos resíduos recicláveis e/ou àqueles destinados à cooperativa(s), pode ser assegurado de alguma maneira que os resíduos não são misturados pelos coletores? *

- ☐ SIM
- ☒ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

11 - Há uma periodicidade estipulada em relação a coleta dos resíduos em geral? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

12 - Qual a periodicidade de coleta dos resíduos vegetais? *

- ☒ Conforme demanda
- ☐ De 1 a 2 vezes por semana
- ☐ Mais de 3 vezes por semana
- ☐ Todos os dias
- ☐ Outros

Em de marcar "Outros", favor descrever:

.....

13 - Como funciona o processo de armazenamento dos resíduos? ★

Favor classificar o tipo de armazenamento de acordo com a especificação do resíduo:

	Depósitos	Transportados para cooperativas	No campus Politécnico	Fazenda Canguiri - UFPR	Outros
Resíduos vegetais (madeira/podas em geral, material de jardinagem)	☐	☐	☐	☒	☐
Resíduos animais (oriundos do biotério)	☒	☐	☐	☐	☐
Resíduos comuns (sólidos recicláveis)	☐	☒	☐	☐	☐
Resíduos orgânicos e rejeitos	☐	☐	☐	☐	☒
Resíduos da construção civil	☐	☐	☐	☐	☒
Resíduos eletrônicos	☐	☒	☐	☐	☐
Resíduos perigosos	☐	☐	☐	☐	☒
Outros não citados anteriormente	☐	☐	☐	☐	☒

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

Em caso de marcar "Outros", favor especificar:

Cada tipo de resíduo é armazenado conforme normas

14 - É realizado algum tipo de tratamento em relação aos resíduos (antes/após e/ou para armazenamento)? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

Em caso de resposta positiva, favor especificar o tipo de tratamento realizado:

Infectantes são autoclavados antes de serem depositados para coleta

15 - Quem realiza o transporte dos resíduos? *

- ☒ Equipe de manutenção da UFPR
- ☒ Empresa terceirizada
- ☐ Prefeitura de Curitiba
- ☐ Outros

Em caso de marcar "Outros" favor descrever:

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

16 - Ainda em relação a questão anterior, o(s) responsável(is) pelo transporte, gera(m) dados de volume obtido, destinação e tratamento de cada tipo de resíduo? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SE APLICA

Caso necessário complementar, favor descrever:

Resíduos de Saúde são pesados no momento da coleta

17 - Caso o transporte seja realizado por uma empresa terceirizada. Essa empresa emite atestados e notas de destinação dos resíduos que assegurem a destinação correta dos resíduos? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SE APLICA

18 - Qual(is) tipo(s) de veículo(s) realiza(m) o transporte/coleta dos resíduos dentro do(s) campus(i)? *

- ☒ Carro elétrico
- ☐ Caminhão baú
- ☒ Outros

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

21 - Os documentos de gestão, transporte e destinação dos resíduos sólidos na UFPR, são armazenados e/ou controlados ? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

22 - É possível verificar se a destinação dos resíduos é realmente a apresentada (seja pela manutenção do campus, empresa terceirizada, prefeitura etc.)? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO
- ☐ NÃO SEI INFORMAR

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms

Entendendo o sistema de gestão de resíduos da UFPR/Curitiba

Em caso de marcar "Outros", favor especificar

Em alguns campi não há carrinho elétrico

19 - Ainda em relação ao veículo utilizado para coleta, são sempre os mesmos veículos, mesmo tipo de combustível utilizados e mesmo trajeto realizado? *

	SIM	NÃO	NÃO SEI INFORMAR
Veículos	☒	☐	☐
Tipo de combustível	☒	☐	☐
Trajeto	☒	☐	☐

20 - Há alguma maneira de checagem/apresentação de dados em relação a gestão dos resíduos coletados, transportados e armazenados? *

- ☒ SIM
- ☐ NÃO

Se "SIM", favor especificar:

através de pesagem e de dimensionamento de volume, no caso dos recicláveis