



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE QUÍMICA E ALIMENTOS
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA BIOQUÍMICA

Operação e Otimização da Planta de Piloto Biofixação de Gás Carbônico por Microalgas da Usina Candiota

RIO GRANDE, RS

2025

1. INFORMAÇÕES GERAIS

1.1. PROJETO

Operação e Otimização da Planta de Piloto Biofixação de Gás Carbônico por Microalgas da Usina Candiota.

1.2. DURAÇÃO: 12 meses

1.3. ENTIDADES PARTICIPANTES

Âmbar Sul Energia S. A.

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Fundação de Apoio à Universidade do Rio Grande - FAURG

1.4. UNIDADE EXECUTORA

Laboratório de Engenharia Bioquímica – LEB

1.5. RESPONSÁVEL

Prof. Dr. Jorge Alberto Vieira Costa

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Laboratório de Engenharia Bioquímica; CEP 96203-900

Rio Grande - RS

Fone: (53) 32338908

(53) 999712050

e-mail: jorgealbertovc@gmail.com

Este relatório é referente ao Primeiro Relatório Quadrimestral do contrato em vigência, até final de agosto de 2025. Abaixo estão descritas as atividades desenvolvidas, conforme convênio firmado:

ATIVIDADE 1: Continuação dos ensaios de crescimento das microalgas com gás de combustão e com altas concentrações de CO₂ em diferentes tipos de fotobiorreatores;

ATIVIDADE 2: Caracterização físico-química da biomassa cultivada na planta piloto;

ATIVIDADE 3: Tratamento dos resultados;

ATIVIDADE 4: Elaboração de relatórios técnicos;

ATIVIDADE 5: Divulgação dos resultados obtidos;

ATIVIDADE 6: Elaboração de artigo técnico para publicação internacional;

ATIVIDADE 7: Realização de seminário interno para apresentação do relatório final e planejamento futuro.

ATIVIDADE ESPECIAL: A equipe da Ambar Sul Energia S. A. deverá manter o cultivo estável de microalgas na UTE Candiota III durante o período desconstrução da Usina, de forma evitar retrocesso no estado atual do Projeto.

2. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS ATÉ AGOSTO DE 2025

Conforme as atividades descritas no Plano de Trabalho do Projeto, foram realizadas as seguintes atividades até final de agosto de 2025:

1. Limpeza dos biorreatores 1 e 2 e manutenção do inóculo da microalga *Spirulina* até a usina voltar às atividades para geração de energia;
2. Capacitação da equipe técnica da Ambar e confecção do POP para uso do espectrofotômetro;
3. Instalação do tanque de tratamento dos resíduos microalgais gerados durante procedimentos operacionais;
4. Instalação da elétrica e de um painel para proteção do sistema de injeção do gás no biorreator 1;
5. Instalação do sistema de agitação por pás rotativas no biorreator de inóculo de *Spirulina*;
6. Coleta de água de produção da Fase C e da água potável utilizada nos cultivos para análises;
7. Confecção de planilhas online para compartilhamento dos resultados obtidos e tarefas executadas diariamente;
8. Instalação do sistema de dreno automático na linha de gás antes da chegada à Unidade de biofixação;
9. Confecção de uma área protegida para manipulação da microalga durante a filtração e manipulação para secagem em estufa;
10. Substituição das mangueiras de sucção do cultivo e retorno do líquido filtrado do filtro prensa.
11. Cultivo da microalga *Spirulina* com injeção do gás de combustão durante o período de inverno.

2.1 – Limpeza dos biorreatores e manutenção do inóculo da microalga *Spirulina*

Após os ensaios realizados em dezembro de 2024, a unidade de biofixação de CO₂ por microalgas ficou em “stand by” até abril de 2025, devido à Usina não estar gerando energia. Nesse período, a unidade de biofixação ficou sob supervisão da equipe técnica da empresa Âmbor Energia.

No início de abril de 2025, os técnicos Andrei e Adriano realizaram uma visita técnica à planta de biofixação de CO₂ com microalga, com o objetivo de realizar a manutenção da cepa de *Spirulina* mantida no biorreator 2, após os ensaios realizados início de dezembro de 2024. Durante a visita, a equipe da Âmbor Energia, nos relatou que o inóculo permaneceu sem manutenção desde a última visita da equipe da FURG, realizada no dia 17 de janeiro. Devido a esse período de inatividade da Unidade de microalgas e por consequência, na manutenção do inóculo, ocorreu grande evaporação da água presente no meio de cultivo. O volume de inóculo no biorreator que estava com 11 m³, apresentou evaporação de aproximadamente 6 m³ de água. Com o objetivo de repor o volume de água evaporada, a equipe da Âmbor Energia realizou a adição novamente de aproximadamente 6 m³ de água ao sistema. No entanto, essa adição inadequada de água no biorreator, acabou comprometendo as condições do meio, ocasionando o rompimento de grande parte das células, resultando em formação de espumas e acúmulo de biomassa morta no sistema e uma significativa redução na concentração celular, que passou de 1,4 g.L⁻¹ para 0,3 g.L⁻¹ (Figura 1).



Figura 1: Biorreator 2 com o inóculo de microalga com formação de espumas e biomassa morta retirada do sistema.

Diante do presente cenário, a equipe da FURG orientou que fosse realizada a adição de 2 m³ de meio de cultivo Zarrouk contendo 30% de NaHCO₃ no biorreator 1. Logo após, foi transferido aproximadamente 5 m³ de inóculo de *Spirulina* do biorreator 2 para o biorreator 1 (Figura 2). Após todo o processo, o biorreator 1 ficou com volume de inóculo de aproximadamente 7 m³, concentração celular 0,23 g.L⁻¹ e pH 9,54. Essa manutenção foi realizada com o objetivo de recuperar a cepa da microalga *Spirulina* que está adaptada às condições ambientais da região e dar continuidade aos cultivos de forma adequada.

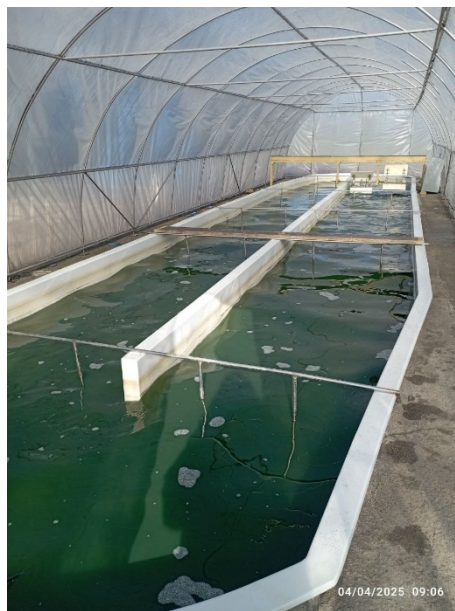


Figura 2: Inóculo da microalga *Spirulina* no biorreator 1 com volume de aproximadamente 7m³.

As instruções adequadas para a manutenção do inóculo microalgal e as respectivas adições de meio de cultivo ou de água evaporada foram repassadas novamente para a equipe que faz a manutenção da Unidade de Biofixação de CO₂ por microalgas. Ficou acertado que, a adição do volume de água evaporada seria repostada diariamente. Para a adição de meio de cultivo Zarrouk no sistema, será necessária uma pré-avaliação da equipe da FURG.

Após a transferência do inóculo de *Spirulina* para o biorreator 1, o volume de inóculo que permaneceu no biorreator 2, foi realizado um pré-tratamento do inóculo com hipoclorito para a inativação e morte celular para descarte (Figura 3).

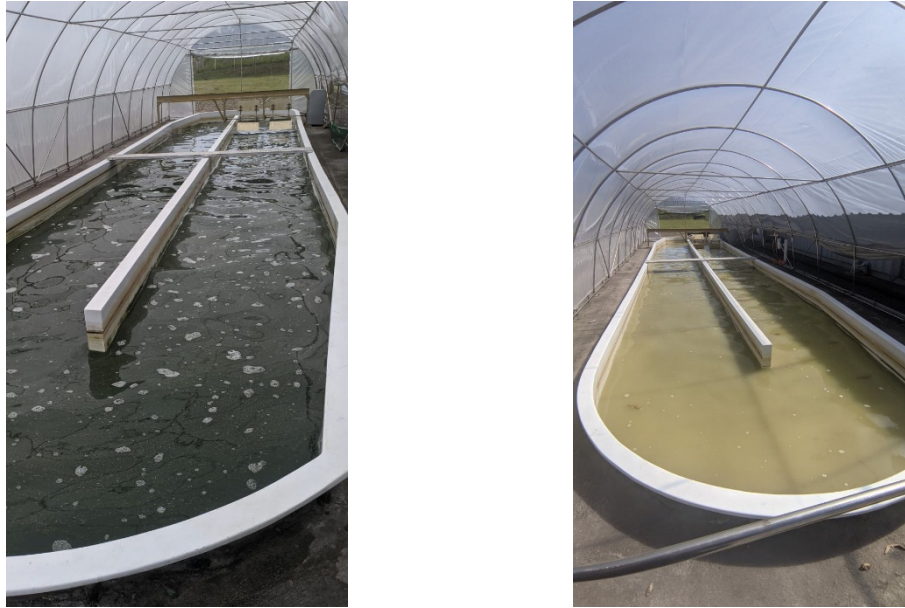


Figura 3: Limpeza do biorreator 2 para posterior descarte da biomassa de microalga morta.

No dia 25 de abril de 2025, os técnicos Adriano e Andrei, juntamente com a Profa. Michele, realizaram uma visita técnica à planta de biofixação de CO₂ por microalgas. O objetivo da visita foi realizar a manutenção da cepa da microalga *Spirulina* mantida no biorreator 1 e realizar a inoculação da microalga no biorreator de inóculo (1,2 m³).

Durante a inspeção, observou-se uma leve melhora na redução de biomassa morta no meio de cultivo (Figura 4). Porém, ainda havia acúmulo de biomassa morta precipitada no fundo do biorreator. Com isso, o procedimento de troca do inóculo para um biorreator limpo, foi adotado para realizar a retirada das células mortas e possíveis contaminantes presentes no cultivo.



Figura 4: Biorreator 1 com o inóculo de *Spirulina*.

Após observada as condições do cultivo, foi realizada a transferência de aproximadamente 500 L de microalga do biorreator 1 para o biorreator de inóculo e, logo após, adicionado 300 L de meio Zarrouk contendo 30% de NaHCO_3 , totalizando um volume de 800 L.

Após realizado o processo, foram coletadas amostras do biorreator 1 e do biorreator de inóculo para observação no microscópio, no Centro de Elaboração de Alimentos com *Spirulina* (CEAS) da FURG (Figura 5). Também foram coletadas amostras para leitura da concentração celular e pH dos cultivos em cada biorreator. As concentrações celulares nos 2 biorreatores após todo o processo, foram, $1,0 \text{ g.L}^{-1}$ no biorreator 1 e $0,60 \text{ g.L}^{-1}$ para o biorreator de inóculo.

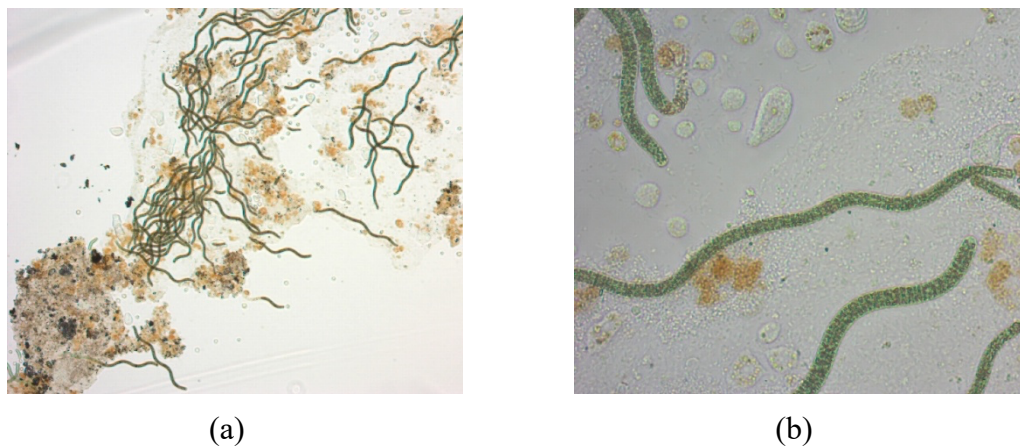


Figura 5: (a) Cultivo da microalga no biorreator 1; (b) microalga no biorreator com a nova inoculação.

Após a drenagem e limpeza do biorreator 2, foi adicionado aproximadamente 6 m^3 de água para deixar aproximadamente 24 h sob agitação por pás rotativas para a evaporação do cloro presente na água. Após, foi adicionado meio de cultivo Zarrouk na concentração de 50% em relação ao volume de água e deixado sob agitação para homogeneização. Em seguida, foi realizada a transferência de aproximadamente 3 m^3 de inóculo da microalga *Spirulina* do biorreator 1 para o biorreator 2 (Figura 6).



Biorreator 1



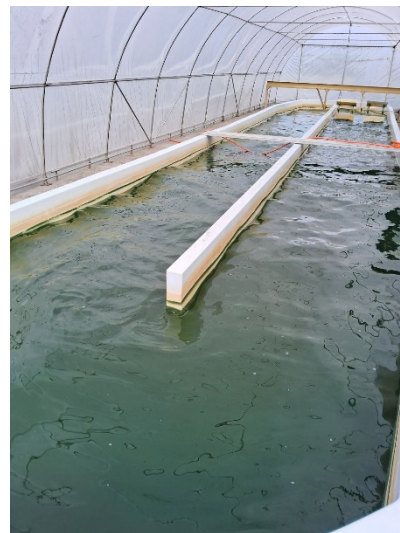
Biorreator 2

Figura 6: Transferência de parte do inóculo do biorreator 1 para o biorreator 2 com adição de novo meio de cultivo Zarrouk.

Após realizados todos os procedimentos adequados para retirada das células mortas presentes no inóculo, foi realizado o aumento gradativo do volume de cultivo nos biorreatores 1 e 2 (Figura 7) para posteriores ensaios com a injeção de gás. Cada biorreator apresenta um volume de aproximadamente 10 m³ de cultivo.



Biorreator 1



Biorreator 2

Figura 7: Aumento gradativo dos volumes dos cultivos da microalga *Spirulina* nos biorreatores 1 e 2 de 18 m³ cada.

2.2 – Capacitação da equipe técnica da Âmbar e confecção do POP para uso do espectrofotômetro

A equipe da FURG fez visitas periódicas à Unidade de Biofixação de CO₂ na Usina Termelétrica de Candiota – Âmbar Energia, para capacitar a equipe técnica pertencente ao Departamento de Meio Ambiente com materiais informativos e treinamentos. No início dos cultivos da microalga na Unidade de Biofixação de CO₂, foi elaborado um POP com as principais atividades a serem desenvolvidas na Unidade. Neste segundo momento, foi elaborado um POP (Anexo 1) para o uso do equipamento espectrofotômetro, equipamento este, utilizado para determinar a concentração celular dos cultivos microalgais.

2.3 – Instalação do tanque de tratamento dos resíduos microalgais gerados durante procedimentos operacionais

Para melhor destino do resíduo gerado durante o manuseio dos cultivos microalgais, ficou definido que seria instalado um sistema de tratamento dos resíduos de microalgas. Foi utilizada uma caixa d'água de 1m³ e realizado a confecção da área de proteção e pavimentação do reservatório pela equipe de operação da empresa Âmbar Energia (Figura 8). A equipe técnica da empresa Âmbar foi orientada pela equipe da FURG sobre quais os procedimentos adequados para o prévio tratamento do resíduo e descarte.



Figura 8: Instalação do tanque para tratamento dos resíduos de microalgas gerados durante a manipulação.

2.4 – Instalação da elétrica e do painel para proteção do sistema de injeção do gás no biorreator 1

Foi solicitada pela equipe da FURG a instalação de um ponto de energia para adequar o sistema elétrico da válvula solenoide e também, a instalação de um painel para proteção de todo o sistema de injeção de gás nos cultivos (Figura 9).



Figura 9: Painel para proteção do sistema de injeção de gás e ponto elétrico instalado.

2.5 - Instalação do sistema de agitação por pás rotativas no biorreator de inóculo da microalga *Spirulina*

Foi realizada a instalação do sistema de agitação por pás rotativas no biorreator de inóculo microalgal. O motor redutor do sistema foi adaptado pela equipe de operação da empresa Âmbor Energia para melhor funcionamento, conforme orientação da equipe da FURG.



Figura 10: Instalação do sistema de agitação por pás rotativas no biorreator de inóculo.

Desde o início da operação do biorreator de inóculo, o cultivo vinha sendo mantido sob agitação por bombas submersas, visto que o sistema de agitação por motor redutor necessitava de reparos e adequações para que a rotação das pás não ultrapassasse 18 rpm. Após as adequações, o motor redutor ficou com uma rotação de aproximadamente 12 rpm, apresentando ótima agitação do inóculo microalgal. Porém, depois de algumas horas de operação, o motor redutor apresentou defeito, sendo necessária nova manutenção. Após reparo realizado, o motor redutor foi instalado novamente e está em funcionamento.

2.6 – Coleta de água de produção da Fase C e água potável utilizada nos cultivos

No dia 09 de junho de 2025 a equipe da FURG representada pelo técnico Adriano Henrard e a doutoranda Taís Lopes, realizaram uma visita técnica à planta de biofixação de CO₂ por microalgas. O objetivo da visita foi realizar uma reunião sobre as atividades a serem executadas e para realizar a coleta de água na saída da Fase C e água de reuso, nas bacias de sedimentação, e da água potável utilizada na Unidade de Biofixação por Microalgas. Após reunião com o Eng. Luis Eduardo para autorização da coleta da água, a mesma foi realizada com o acompanhamento da técnica Ana, da equipe da Âmbor Energia, a qual nos levou até as bacias de sedimentação. Foi coletado aproximadamente 70 L de água de produção da Fase C e 70 L da água de reuso das bacias de sedimentação, conforme ilustrado a Figura 11.



Figura 11: Coleta da água de produção da Fase C e água de reuso para análises.

A água coletada foi transportada até a Universidade Federal do Rio Grande – FURG para o armazenamento adequado e envio para a empresa TOXILAB, para a realização das análises necessárias, conforme o estudo que vem sendo realizado pela doutoranda Taís em sua Tese.

2.7 – Confeção de planilhas online para compartilhamento dos resultados obtidos e tarefas executadas diariamente;

Para melhor acompanhamento dos resultados obtidos diariamente, a equipe da FURG elaborou planilhas online para compartilhamento dos dados (Figura 12a). Também foi elaborada uma planilha nomeada como “checklist” para as anotações diárias das tarefas que devem ser executadas na Unidade (Figura 12b). As planilhas vêm sendo alimentadas pela equipe Âmbor Energia e o tratamento e análise dos resultados vem sendo realizada pela equipe técnica da FURG.

Biorreator Inóculo: <i>Spirulina</i> LEB-18 X _{inicial} = 0,20 g/L; Meio Zarrouk padrão													
Dia	Hora	Temp. Min. Ambiente	Temp. Máx. Ambiente	Temp. Min. Líquido	Temp. Máx. Líquido	Dil.	%T ₁	%T ₂	%T ₃	C (g/L)	pH	Vol. Rep. H ₂ O	Observações
02/04	11:00	-	-	-	-	1	35,5	36	36	0,202	-	-	Vol. inicial: 350L
03/04	10:00	14,7	28,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04/04	10:00	18,6	30,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05/04	10:00	14,7	32,2	-	-	-	-	-	-	-	-	10 L (0,5 cm)	-
08/04	10:00	19,7	43,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09/04	11:00	36,2	45,5	25,6	26,3	2	41,7	41,9	41,5	-	9,87	-	-
09/04	15:00	29,9	48,6	25,6	29,5	2	42,3	44,1	43,3	-	9,67	-	-
10/04	09:00	18,3	48,6	22,1	29,5	2	41,4	43,0	42,4	-	9,76	5 L (0,25 cm)	-
10/04	15:30	25,3	32,5	23,0	27,8	2	42,1	44,3	42,8	-	9,85	-	-
11/04	09:00	18,5	32,5	22,2	27,9	2	40,3	39,4	37,7	-	9,92	-	-
11/04	15:00	20,9	30,0	22,3	26,3	2	38,9	37,5	39,5	-	9,94	-	-

(a)

Planilha Diária de Monitoramento - Unidade de Biofixação de CO ₂ por Microalgas				
Checklist diário	Data:		Hora:	
	Temperatura Ambiente (°C)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Temperatura no meio líquido (°C)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Condições do Tempo	() Sol () Chuva () Nublado		
	Tanque (Tq) em Operação	() inóculo () 01 () 02		
	Limpeza diária do cultivo - retirada de sujeiras	() inóculo () tq 01 () tq 02		
	Funcionamento sistema de agitação (pás)	() ok! Inóculo () ok! tq 01 () ok! tq 02		
	Abertura estufas (temp. acima de 35°C)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Purga na linha de gás (amarela)	() Sim () Não		
	Volume de operação (L) Tq inóculo		Vol. repostado água evaporada (L)	
	Volume de operação (m³) Tq 1		Vol. repostado água evaporada (L)	
	Volume de operação (m³) Tq 2		Vol. repostado água evaporada (L)	
	Leitura da concentração celular (g.L ⁻¹)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	pH	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
Retirada biomassa	Filtração filtro prensa			
	Purga compressor antes de iniciar filtração	() Sim () Não		
	Funcionamento sistema de filtração	() Sim () Não		
	Ciclos de filtração	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Biomassa úmida retirada (Kg)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Biomassa seca (Kg)	Tq inóculo:	Tq 01:	Tq 02:
	Temperatura estufa secagem (°C)			
Obs.:				
Execução:		Revisão:		
Responsável Técnico:				
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> ◀ ▶ 05.05.25 06.05.25 07.05.25 08.05.25 09.05.25 10.05.25 11.05.25 </div>				

(b)

Figura 12: (a) Planilha de acompanhamento diário das análises realizadas nos cultivos com a microalga *Spirulina* e, (b) planilha “checklist” para anotações diárias das tarefas realizadas na Unidade.

2.8 – Instalação do dreno automático na linha de gás antes da chegada à Unidade de biofixação:

Após a equipe técnica da empresa Âmbor observar que estava ocorrendo acúmulo de líquido na linha de gás que sai do Tie-In até a Unidade de Biofixação por Microalgas e ter instalado uma válvula manual para descarga diária do líquido (Figura 13a), foi realizada a instalação de um dreno automático (Figura 13b). A instalação do dreno automático evita o acúmulo de líquido na linha de gás, evitando possíveis corrosões na tubulação e alterações na composição do gás de combustão que chega até a Planta de Microalgas.



(a)



(b)

Figura 13: (a) Dreno manual instalado anteriormente e (b) Dreno automático.

2.9 – Confeção de uma área para manipulação da microalga após filtração:

Para melhor manipulação da microalga após separação da biomassa do meio líquido, foi realizada a confecção de uma área coberta com proteções laterais (Figura 14). Essa área foi solicitada pela equipe da FURG após filtração e manipulação da microalga durante alguns testes. Foi solicitada a área protegida, para evitar o manuseio da biomassa em locais impróprios dentro da Unidade, e de modo que o efluente gerado durante o processo fosse coletado diretamente para um tanque de tratamento de resíduos microalgais.



Figura 14: Área confeccionada para manipulação da microalga após filtração.

Nessa área serão realizadas as atividades de: descloração da água em tanque de inox, utilizada para preparo de meio de cultivo; filtração do meio líquido para separação

da biomassa microalgal; retirada da “torta” de biomassa das placas do filtro prensa formada após a filtração e manuseio da biomassa úmida para extrusão em formato de espaguete para secagem da biomassa em estufa de bandejas instalada no container.

2.10 – Substituição das mangueiras do filtro prensa;

Foi solicitada pela equipe técnica da FURG à empresa Âmbar a substituição das mangueiras que compõem o filtro prensa devido as mesmas não estarem de acordo com o manual do equipamento (Figura 15). O conjunto de mangueiras antigas era fracionada, apresentando diversos vazamentos e adaptações, acarretando o funcionamento parcial da bomba pneumática para sucção do meio líquido a ser filtrado. Após a instalação do conjunto de mangueiras novas, o processo de filtração apresentou melhor rendimento.



Figura 15: (a) e (b) Mangueiras antigas; (c) Conjunto de mangueiras novas.

2.11 – Ensaio com a microalga *Spirulina* com injeção do gás de combustão durante o período de inverno.

Após o primeiro cultivo da microalga *Spirulina* realizado com o gás de combustão em dezembro de 2024, em Usina Candiota III parou a geração de energia por tempo indeterminado, e o projeto ficou em “stand by” conforme contrato, até que voltasse a geração de energia e, por consequência, as emissões dos gases de combustão. Em meados de junho, a Usina voltou a gerar energia e, em 1º de julho de 2025, o projeto retornou as atividades para se dar início ao cultivo com injeção do gás de combustão. As condições utilizadas no cultivo da microalga *Spirulina* foram as mesmas testadas em dezembro/2024, porém, sob condições climáticas do período de inverno, para se avaliar

a influência das altas e baixas temperaturas durante o cultivo com a injeção do gás de combustão.

Ficou definido então, que o cultivo da microalga com o gás de combustão seria utilizado uma vazão de gás de $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, medida através de rotâmetro acoplado ao sistema, e o controle da injeção do gás foi mantido com auxílio de válvula solenóide conectada a um temporizador (Figura 16). A agitação dos cultivos foi realizada através de pás rotativas a 18 rpm.



Figura 16: Sistema utilizado para controle de vazão e tempo de injeção do gás no cultivo da microalga *Spirulina*.

A injeção do gás de combustão no cultivo foi realizada de forma intermitente: 5 s de injeção do gás no cultivo e 30 s sem injeção, totalizando 8,5 s a cada min, realizada no início do expediente da manhã até às 16 h de cada dia. A concentração celular inicial do ensaio foi de aproximadamente $0,49 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, definida após as bateladas de filtrações realizadas para retirada de biomassa dos biorreatores 1 e 2 para que a concentração do cultivo nos 2 biorreatores estivessem mais próximas possíveis para comparação do crescimento celular. O volume de cultivo em cada biorreator foi de 11 m^3 . Na Tabela 1 estão apresentadas as condições de cultivo utilizadas no ensaio com e sem injeção do gás de combustão.

Tabela 1: Condições de cultivo da microalga *Spirulina* com o gás de combustão e ensaio controle durante o inverno (julho de 2025).

Biorreator 1	Biorreator 2
Cultivo com injeção de gás	Cultivo controle
Concentração celular inicial: 0,485 g.L ⁻¹	Concentração celular inicial: 0,493 g.L ⁻¹
Vazão de gás: 0,4 m ³ .h ⁻¹	Vazão de gás: sem injeção
Tempo de injeção do gás: 5 s	Meio Zarrouk com 30% de NaHCO ₃
Tempo sem injeção do gás: 30 s	

2.11.1 – Metodologia de fixação de CO₂ e análise da biomassa

2.11.1.1 – Taxa de biofixação de dióxido de carbono (TB)

A taxa biofixação de CO₂ (TB, g.L⁻¹.d⁻¹) pela microalga foi calculada segundo a Equação 1, em que P_X (g.L⁻¹.d⁻¹) foi a produtividade volumétrica de biomassa, M_{CO₂} é a massa molar de dióxido de carbono e M_C é a massa molar do carbono.

$$TB = P_{\text{máx}} * 0,5 * \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_C} \quad (1)$$

2.11.1.2 - Eficiência de utilização de dióxido de carbono

A eficiência de utilização de CO₂ (E, % m.m⁻¹) foi calculada segundo a Equação (2), em que TB é a taxa de biofixação de CO₂ diária (g.L⁻¹.d⁻¹), V_{útil} o volume útil de trabalho do biorreator (L) e \dot{m} a taxa mássica de alimentação diária com CO₂ (g.d⁻¹).

$$E = \frac{TB * V_{\text{útil}}}{\dot{m}} * 100 \quad (2)$$

2.11.1.3 - Carbono inorgânico dissolvido (DIC)

A alcalinidade e o conteúdo de íons hidróxido, carbonato e bicarbonato foram determinados por titulação com HCl utilizando fenolftaleína e metil-orange como indicadores, segundo metodologia do Standard Methods (CLESCERI, 1998). A alcalinidade foi determinada através da Equação 3.

$$\text{Alcalinidade} = (N * V_{\text{ácido}} * \text{eq}) / V_{\text{filtrado}} \quad (3)$$

N: normalidade do ácido de titulação;

$V_{\text{ácido}}$: volume de ácido clorídrico gasto na titulação (mL);

eq (mg): equivalente grama do CaCO_3 ;

V_{filtrado} : volume de amostra filtrada (mL).

Para a quantificação do carbono inorgânico dissolvido (DIC) faz-se uma relação entre o conteúdo de íons hidroxila, carbonatos e bicarbonatos que está representado na Equação 4.

$$\text{DIC} = m_C / (m_{\text{CaCO}_3}) \times (m_{\text{CO}_3} + m_{\text{HCO}_3}) \quad (4)$$

Onde: m_C , m_{CaCO_3} , m_{CO_3} e m_{HCO_3} ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$): massas molares do carbono, carbonato de cálcio, carbonato e bicarbonato, respectivamente.

2.11.1.4 - Recuperação e caracterização da biomassa

Após os 10 d de ensaio, a biomassa da microalga *Spirulina* foi recuperada do meio líquido por filtração em filtro prensa de placas. Logo após, a biomassa foi extrusada e acomodada em bandejas para secagem em estufa com circulação de ar forçada a 45 °C e armazenada em freezer para posterior caracterização.

A concentração das principais biomoléculas, proteínas (LOWRY et al., 1951), carboidratos (DUBOIS et al., 1956) e lipídios (MARSH; WEINSTEIN, 1966), serão determinadas por métodos espectrofotométricos, enquanto que a umidade e cinzas serão determinadas por método gravimétrico (AOAC, 2000).

Os resultados de biofixação de CO_2 pela microalga foram avaliados utilizando análise de variância (ANOVA) e teste t para comparação das médias, com intervalo de 95% de confiança. Os resultados das análises obtidos das biomoléculas (proteínas, carboidratos e lipídios) serão apresentados no próximo relatório quadrimestral.

2.11.1.5 – Resultados obtidos

Após 10 d de ensaio durante o período de inverno, observou-se que ambos cultivos apresentaram crescimento celular. A Figura 17 mostra os cultivos realizados com a microalga com e sem injeção do gás de combustão.

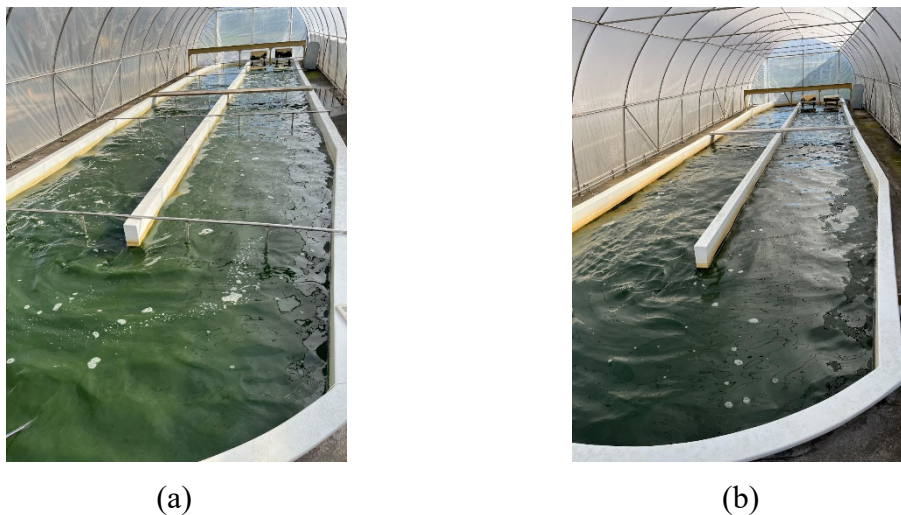


Figura 17: Cultivo da microalga *Spirulina* com injeção do gás de combustão (a) e cultivo controle (b) durante o inverno.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos dos cultivos da microalga *Spirulina* com e sem injeção de gás de combustão no meio durante o período de inverno (julho/2025).

Tabela 2: Concentração celular máxima de crescimento ($X_{m\acute{a}x}$), Produtividade máxima obtida ($P_{m\acute{a}x}$), Taxa de Biofixação (TB) e Eficiência de Biofixação do CO_2 (E_{CO_2}) da microalga *Spirulina* cultivada com adição de gás de combustão da geração termelétrica e na condição controle durante os 10 d de inverno.

Parâmetro	Condição	
	Com gás de combustão	Controle
$X_{m\acute{a}x}$ (g.L ⁻¹)	0,73 ± 0,008 ^b	0,77 ± 0,009 ^a
$P_{m\acute{a}x}$ (mg.L ⁻¹ .d ⁻¹)	72,7 ± 4,3 ^a	69,0 ± 17,4 ^b
TB (mg.L ⁻¹ .d ⁻¹)	58,7 ± 3,4	-
E_{CO_2} (%)	54,3 ± 2,9	-

Letras minúsculas sobrescritas iguais na mesma linha indicam que as médias não diferem estatisticamente ao nível de 95% de confiança ($p > 0,05$).

As maiores concentrações celulares obtidas foram de $0,73 \text{ g.L}^{-1}$ e $0,77 \text{ g.L}^{-1}$, quando a microalga foi cultivada com e sem injeção do gás de combustão, respectivamente, apresentando diferença significativa estatisticamente ($p < 0,05$). A maior produtividade de biomassa foi obtida no cultivo com injeção de gás de combustão, alcançando $72,3 \text{ mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$, diferindo estatisticamente quando comparado ao cultivo controle da microalga *Spirulina* (meio Zarrouk contendo 30% de NaHCO_3). As Figuras 18 e 19 mostram as curvas de crescimento celular e a produtividade obtidas de ambos os cultivos durante o inverno.

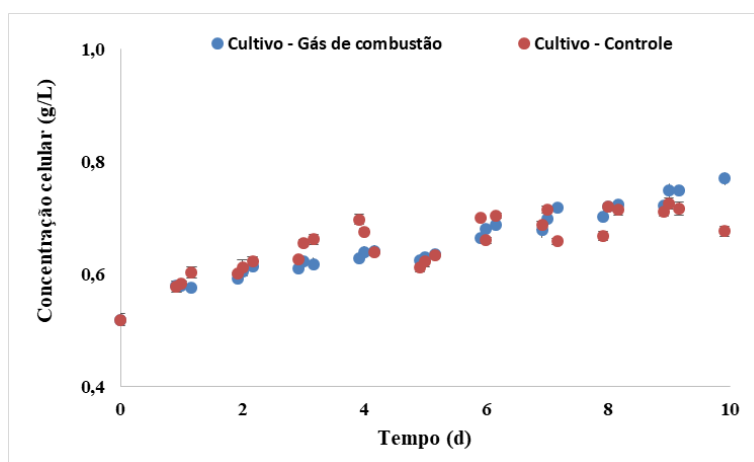


Figura 18: Curva de crescimento celular dos cultivos com e sem injeção do gás de combustão ao longo dos 10 d de cultivo da microalga *Spirulina*.

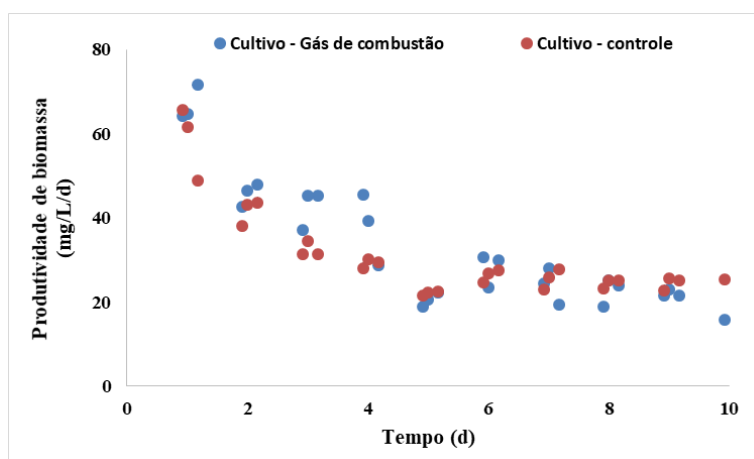


Figura 19: Produtividade de biomassa da microalga *Spirulina* ao longo dos 10 d de cultivo quando cultivada com e sem injeção do gás de combustão.

Quando o cultivo com injeção do gás de combustão realizado durante o inverno (julho) é comparado ao cultivo realizado durante o verão (dezembro), podemos observar

que o crescimento celular se apresenta parecido em ambos os cultivos (Figura 20) durante os 10 d de ensaio. Porém quando avaliamos a produtividade de biomassa, observa-se que o cultivo realizado com injeção de gás durante o inverno apresentou valores acima do cultivo realizado durante o verão nos primeiros 4 d de cultivo e, logo após, os valores apresentaram-se semelhantes (Figura 21).

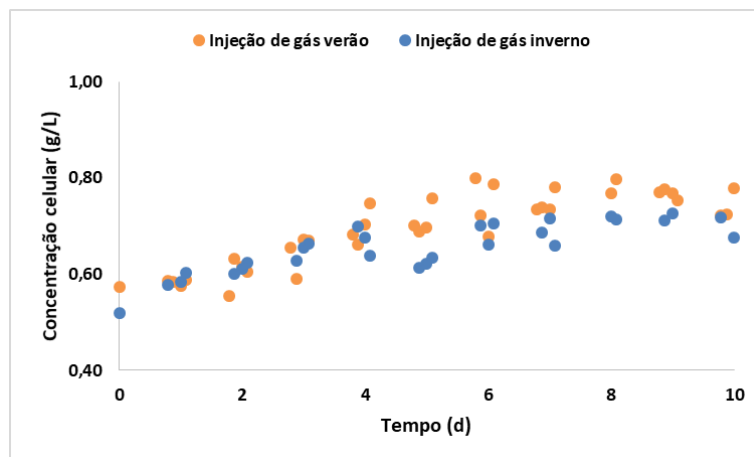


Figura 20: Curva de crescimento celular da microalga *Spirulina* quando comparados os cultivos realizados durante o verão e inverno.

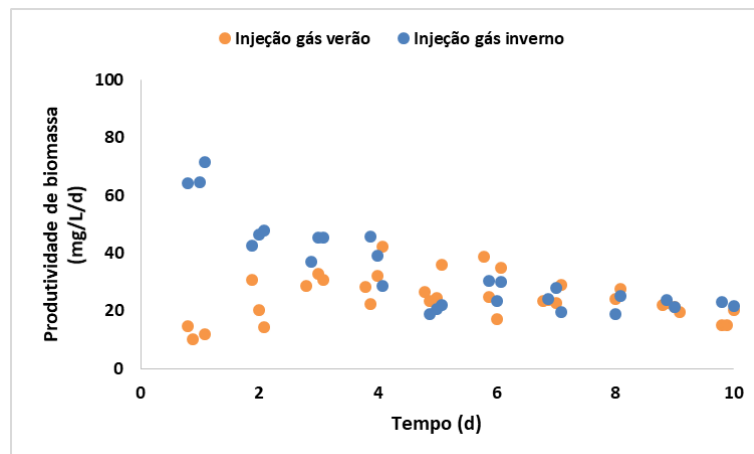


Figura 21: Produtividade de biomassa da microalga *Spirulina* com injeção do gás de combustão durante o verão e inverno.

A Figura 22 apresenta os valores de pH ao longo dos 10 d de cultivo da microalga *Spirulina* durante o período de inverno, com e sem injeção do gás de combustão. Pode-se observar que os valores de pH no primeiro dia de cultivo se apresentavam com valores próximos de 9,85 para ambos os cultivos. Se observa também que nos primeiros 5 d de cultivo, os valores de pH do ensaio com injeção do gás de combustão foi em torno de 9,5

e, do sexto dia até o término dos ensaios, os valores de pH ficaram entre 9,05 e 8,71. Esses valores de pH do cultivo da microalga com injeção do gás de combustão quando comparados ao cultivo controle, se deve ao fato da dissociação do CO_2 no meio de líquido, fazendo com que o meio acidifique através da formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido carbônico é fraco, mas se dissocia parcialmente em íons bicarbonato (HCO_3^-) e prótons H^+ , acidificando o meio.

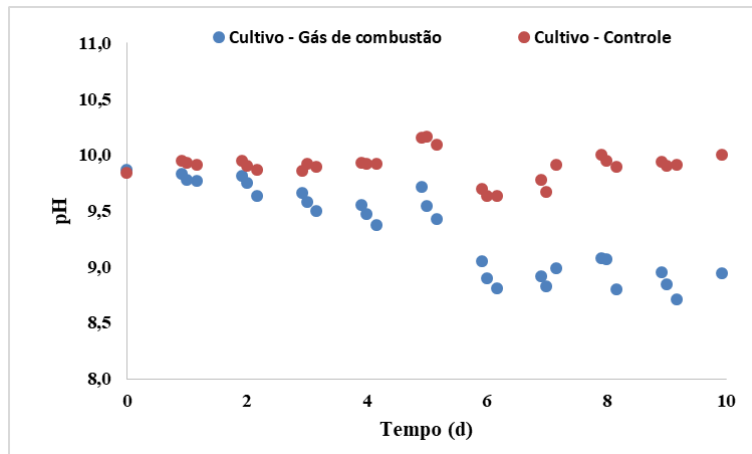


Figura 22: Valores de pH dos cultivos da microalga *Spirulina* cultivada durante o inverno.

A Figura 23 mostra a Taxa de Biofixação de CO_2 (TB, $\text{mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$) obtida pela microalga *Spirulina* durante os 10 d de ensaio (inverno), considerando a fração mássica de carbono (C) (0,474). A taxa média de biofixação de CO_2 foi de $58,7 \text{ mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$ (Tabela 6). O maior valor de taxa de biofixação de CO_2 foi encontrado no 3º dia de cultivo, obtendo-se $126,3 \text{ mg.L}^{-1}.\text{d}^{-1}$.

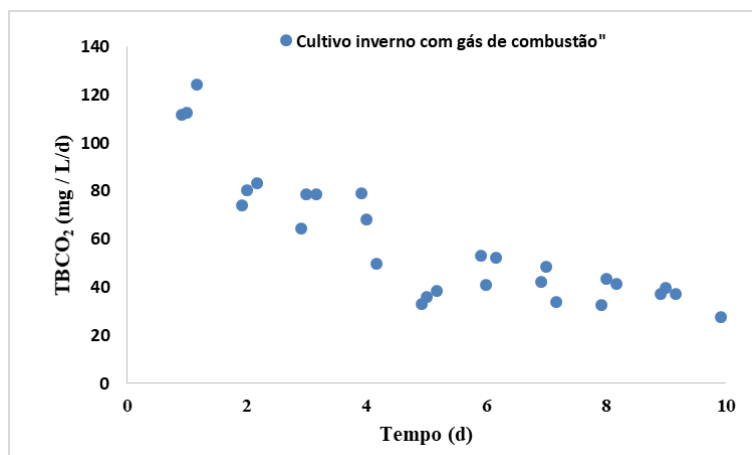


Figura 23: Taxa de biofixação de CO_2 (TB) realizada pela microalga quando cultivada com injeção do gás de combustão ao longo dos 10 d de cultivo durante o inverno.

Quando comparada a taxa de biofixação (TB) dos cultivos da microalga *Spirulina* submetida a diferentes condições ambientais (verão e inverno), podemos observar que as taxas de biofixação do cultivo realizado com injeção do gás de combustão durante o inverno foram maiores nos primeiros 4 d de cultivo quando comparadas com o cultivo realizado no verão. Logo após, os valores de TB variaram entre 27 e 65 mg.L⁻¹.d⁻¹ (Figura 24).

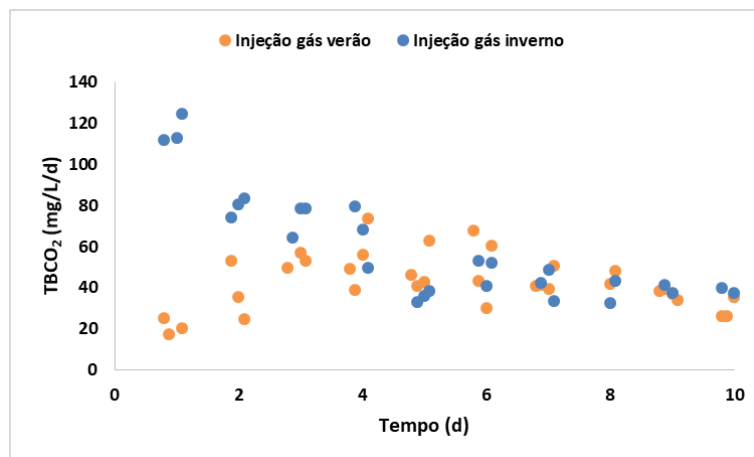


Figura 24: Taxa de biofixação de CO₂ (TB) durante os 10 d de cultivo da microalga *Spirulina* com injeção do gás de combustão durante o verão e inverno.

A temperatura do meio de cultivo está diretamente relacionada com a solubilidade do CO₂ no meio líquido. Segundo a Lei de Henry, a quantidade de gás que se dissolve em um meio líquido é proporcional à sua pressão parcial e ao coeficiente de solubilidade (constante de Henry) (Figura 25).

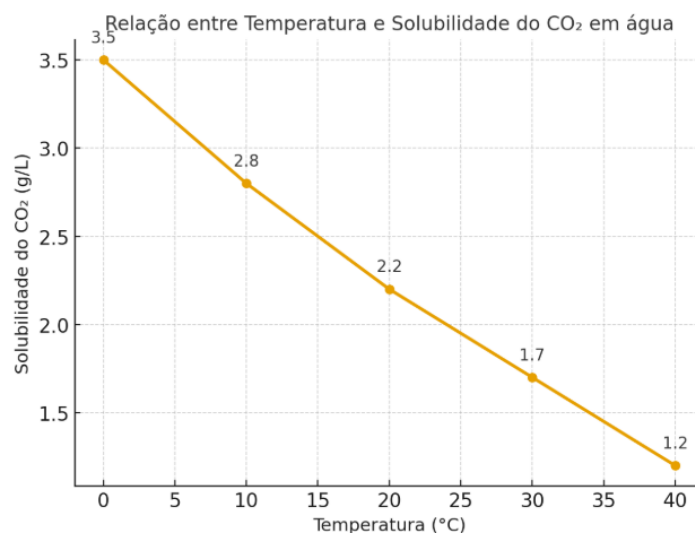


Figura 25: Relação entre a solubilidade do CO₂ e temperatura em água. Fonte: APHA (2017).

A Figura 26 mostra as temperaturas coletadas dos cultivos da microalga *Spirulina* durante o verão e inverno ao longo dos 10 d de ensaio em cada estação. Pode-se observar que o cultivo realizado no verão (dezembro), as temperaturas variaram entre 27,2 e 21 °C, e para o ensaio conduzido durante o período de inverno (julho) as temperaturas variaram entre 21,5 e 14,1.

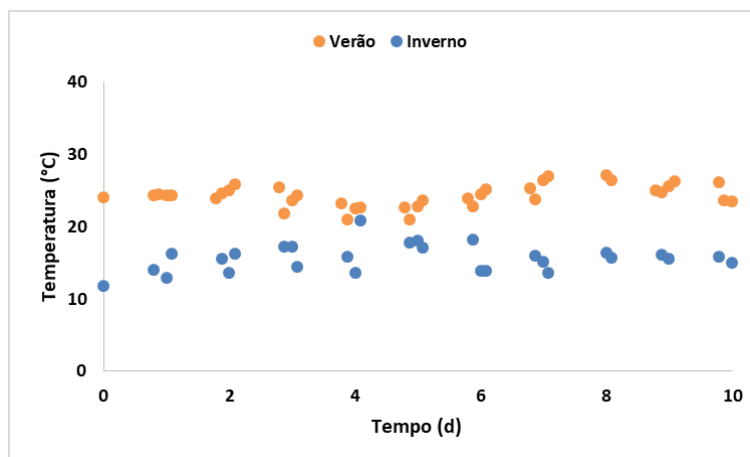


Figura 26: Temperaturas obtidas ao longo dos 10 d de cultivo da microalga *Spirulina* durante o verão e inverno.

Quando o cultivo da microalga é realizado em baixas temperaturas (≤ 20 °C), o CO_2 presente no gás injetado no meio líquido apresenta maior solubilidade, fazendo com que maior quantidade do gás se dissolva no meio, favorecendo a disponibilidade de carbono inorgânico dissolvido (H_2CO_3 , HCO_3^- e CO_3^{2-}) para a microalga. Já, em cultivos realizados em faixas de temperaturas predominantes durante o verão (≥ 30 °C) o CO_2 apresenta-se menos solúvel no meio líquido, acarretando na menor eficiência de biofixação do CO_2 pela microalga.

Na Figura 27 é possível observar a quantificação do carbono inorgânico dissolvido (DIC, mg.L^{-1}) ao longo dos 10 d de cultivos com a microalga *Spirulina* realizados durante os períodos de verão e inverno com injeção do gás de combustão. Durante o período de inverno observou-se que os valores do DIC sobem gradualmente, atingindo máximo valor no 10º dia de cultivo (1.022 mg.L^{-1}). Já no cultivo da microalga durante o verão (dezembro), o DIC também apresenta aumento nos valores, porém, atingindo valor máximo de $847,81 \text{ mg.L}^{-1}$ no último dia de cultivo. A diferença do DIC entre os dois ensaios quando a microalga foi cultivada com injeção do gás de combustão indica que, para a mesma taxa de injeção do gás ($0,4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$), a eficiência de dissolução do CO_2 no

meio é maior para temperaturas mais baixas (inverno), favorecendo assim a disponibilidade do CO₂ no meio de cultivo.

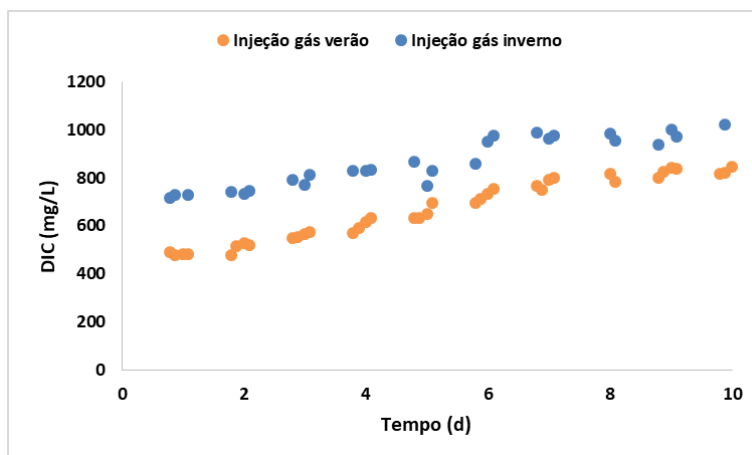


Figura 27: Resultados alcançados do carbono inorgânico dissolvido (DIC) no meio de cultivo ao longo dos 10 d de ensaio com a microalga *Spirulina* durante o verão e inverno.

A Figura 28 mostra a eficiência de utilização do CO₂ (E, % m.m⁻¹) pela microalga *Spirulina* quando cultivada com injeção do gás de combustão durante o inverno. A eficiência média obtida durante os 10 d de cultivo foi $25,4 \pm 1,5$ %, já a eficiência máxima obtida foi de $54,3 \pm 2,9$ % no 1º dia de cultivo.

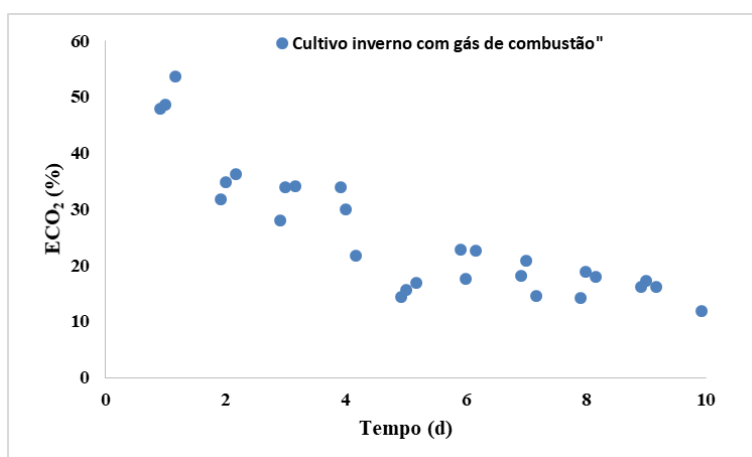


Figura 28: Eficiência de biofixação de CO₂ pela microalga *Spirulina* quando cultivada com injeção do gás de combustão durante os 10 d no inverno.

Quando comparada a eficiência de biofixação pela microalga durante os cultivos realizados no verão e inverno (Figura 29), pode-se observar que a maior eficiência foi

obtida durante o ensaio realizado no inverno (54,3 %). Para o cultivo realizado durante o verão, a maior eficiência de biofixação pela microalga *Spirulina* foi de 36,4 %.

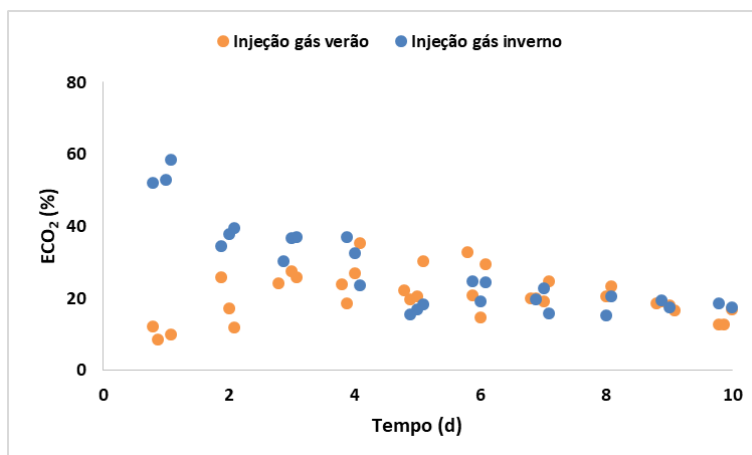


Figura 29: Eficiência de biofixação de CO₂ pela microalga *Spirulina* cultivada com injeção do gás de combustão durante o verão e inverno.

Os resultados obtidos nos cultivos nas diferentes condições ambientais evidenciam que a melhor eficiência de biofixação do CO₂ pela microalga *Spirulina* foi durante o período de inverno. Nesta condição, a temperatura do meio de cultivo favorece a solubilidade do CO₂ no líquido. Um fator importante que se deve destacar é a utilização das estufas de hidroponia para proteger os cultivos. Com a estufa é possível manter a temperatura do cultivo mais elevada durante o inverno (durante o ensaio variou entre 21,5 e 14,1 °C). Sem essa proteção, provavelmente os cultivos estariam submetidos a baixas temperaturas devido a estação do ano em que foi realizado o ensaio, dificultando ou até mesmo inativando o crescimento celular da microalga.

Para se obter melhores resultados nos cultivos durante o período de verão, alguns fatores devem ser adotados na Unidade de biofixação: cobrir as estufas com sombrite para evitar alta incidência luminosa durante o verão e por consequência, reduzir a temperatura dentro da estufa. Os cultivos vêm sendo submetidos a altas temperaturas, dificultando a solubilidade do gás no meio líquido e por consequência, diminuindo a eficiência de biofixação do CO₂ presente no gás de combustão pela microalga; realizar a abertura diária das portas e laterais das estufas, para que ocorra a circulação do ar dentro da mesma; confecção de mais uma porta em cada estufa para aumentar a área de circulação do ar.

Após os 10 d de ensaio durante o inverno (julho), os cultivos foram encerrados para separação da biomassa de microalga do meio líquido. A biomassa úmida obtida após

filtração em filtro prensa foi extrusada em prensa manual (Figura 30) e seca em estufa de bandejas com circulação de ar forçada.

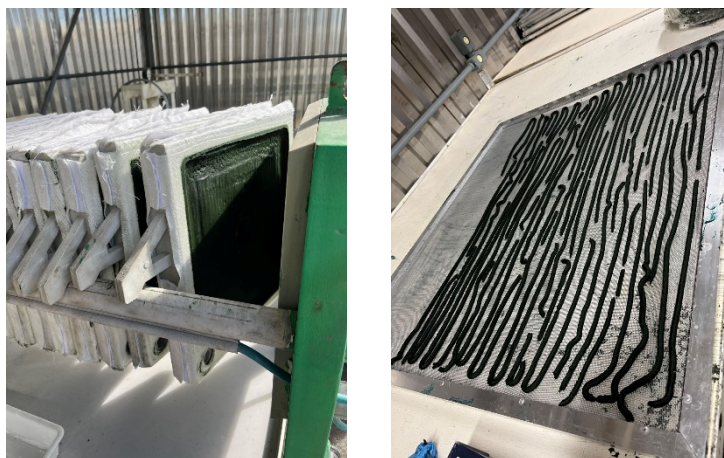


Figura 30: Separação da biomassa do meio líquido por filtração e secagem em estufa.

Os resultados das análises das biomoléculas (proteínas, carboidratos e lipídios) na biomassa da microalga cultivada no ensaio com e sem injeção do gás de combustão durante o mês de julho (inverno) serão apresentados no próximo relatório quadrimestral.

3. EQUIPE TÉCNICA

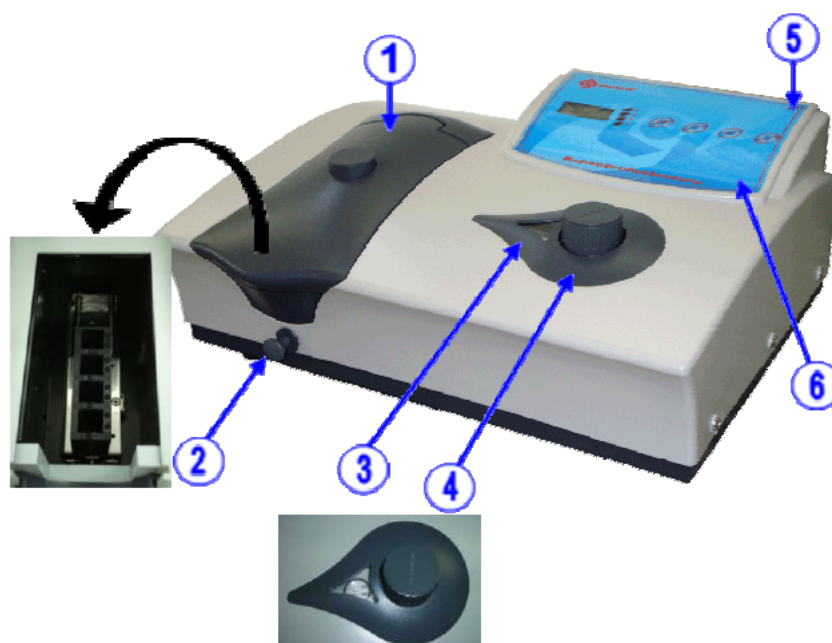
NOME	CATEGORIA	FUNÇÃO
Adriano Seizi Arruda Henrard	Doutor	Gerente
Ana Claudia Araujo Almeida	Doutoranda	Pesquisador
Andrei Vallerão Igansi	Doutor	Técnico
Bruna da Silva Vaz	Doutora	Pesquisador
Gabriel Martins da Rosa	Doutor	Pesquisador
Gabriela Barcellos Curi Leal	Doutoranda	Pesquisador
Jacinta Lutécia	Doutoranda	Pesquisador
Jorge Alberto Vieira Costa	Doutor	Coordenador
Jenyfer Conceição	Doutoranda	Pesquisador
Lucio Bruschi	Mestre	Consultor
Luiza Moraes	Doutora	Pesquisador
Michele Greque de Moraes Costa	Doutora	Pesquisador
Richard Nobre Leal	Doutorando	Pesquisador
Thaís Duarte Santos	Doutora	Pesquisador

ANEXO

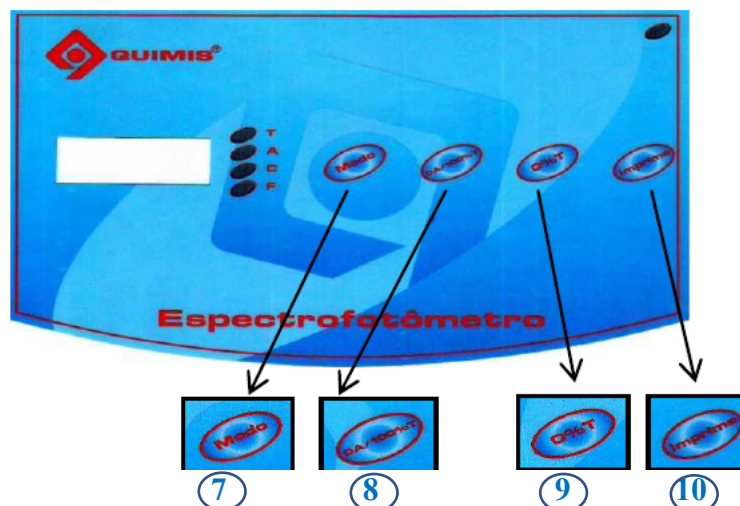
Anexo 1:

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA USO DO ESPECTROFOTÔMETRO

A seguir são descritos passo-a-passo, o manuseio e funcionamento do equipamento espectrofotômetro alocado na Unidade de biofixação de CO₂ por microalgas.



1. Compartimento de amostras: mantém a refrigeração e luminosidade adequada para leitura da amostra;
2. Puxador do carrinho de cubetas;
3. Visor de indicação do comprimento de onda atual graduado em intervalos de 2nm;
4. Seletor do comprimento de onda;
5. Lâmpada Piloto indicadora de funcionamento: acende quando o aparelho está em funcionamento;
6. Controlador com: display de leitura, led's indicadores de modo de funcionamento, teclas de trabalho;



7. Tecla **Modo** (Transmitância / Absorbância / Concentração / Fator);
8. Tecla **0A/100%T**;
9. Tecla **0%T**;
10. Tecla **Imprime** (Envio de dados para impressora ou computador, através de saída RS232C).

Manuseio e funcionamento do espectrofotômetro:

- Conectar o cabo de energia do equipamento na tensão 220 V;
- Ligar o botão LIGA/DESLIGA na parte traseira do equipamento;
- Aguardar aproximadamente 15 min para o seu aquecimento, antes de ser utilizado para as rotinas;
- Selecionar o comprimento de onda girando o seletor (4) até 670 nm;



No centro do visor do seletor há uma linha bem fina. O comprimento de onda deve estar sob esta marca.

- Preencher a cubeta com água destilada (aproximadamente 4 mL), sempre segurando no lado fosco da cubeta ou com ranhuras;



O volume de amostra dentro da cubeta deve estar aproximadamente neste nível.

- Encaixar a cubeta no carrinho de cubetas que se encontra dentro do compartimento de amostras (1) e certifique-se de que a parte límpida da cubeta esteja no raio de ação da luz e que o carrinho esteja corretamente posicionado;
- Fechar a tampa de compartimento de amostras (1);
- No Pannel, com a tecla “**Modo**”, selecione a opção de **Transmitância (T)**;
- Apertar a tecla “**0A/100%T**”. No display mostrará a sigla **BLA**, piscando até aparecer no display o valor **100,0**;
- Remover a cubeta do compartimento de amostras e descartar a água;
- Secar a cubeta com papel macio e colocar a amostra a ser analisada;
- Agitar a cubeta 3 vezes antes colocar no carrinho de cubetas para fazer a leitura.
- Colocar a cubeta com a amostra no equipamento, aguardar 3 segundos e anotar o valor obtido (%T);
- Caso o valor de %T obtido na leitura apresente-se fora da faixa de leitura (30 a 70%), realizar a diluição da amostra;

Diluição 1	própria amostra
Diluição 2	2 mL amostra + 2 mL água destilada
Diluição 3	2 mL amostra + 4 mL água destilada
Diluição 4	2 mL amostra + 6 mL água destilada
Diluição 5	2 mL amostra + 8 mL água destilada

- Após, realizar a leitura da Transmitância (%T) em triplicata. Caso algum ponto se apresente fora da leitura, realizar uma quarta análise e descartar o ponto fora.
- Colocar os valores de %T obtidos para a planilha que contém a curva padrão, para obtenção dos valores de concentração celular.

Limpeza e conservação do equipamento:

- Para conservar o aparelho sugere-se uma limpeza periódica. Na parte externa (carcaça) utilize lustra-móveis;

- Lavar as cubetas com detergente neutro e secar com papel macio após cada uso. Tomar cuidado para não riscar a cubeta, pois isso comprometerá os resultados;

Caso a cubeta apresente riscos ou defeitos, a mesma deve ser substituída por outra nova.