



# Avaliação do efeito da luz intermitente na taxa de crescimento da microalga *Chlorella zofingiensis*

LIZA MARIA LANFRANCHI

novembro de 2018

Avaliação do efeito da luz intermitente na taxa de  
crescimento da microalga *Chlorella zofingiensis*

Liza Maria Lanfranchi

Dissertação submetida para a obtenção do grau de  
Mestre em Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

novembro de 2018



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do  
Mestrado em Energias Sustentáveis

Candidato: Liza Maria Lanfranchi, Nº 1160049, [1160049@isep.ipp.pt](mailto:1160049@isep.ipp.pt)

Orientação Científica: Nídia de Sá Caetano, [nsc@isep.ipp.pt](mailto:nsc@isep.ipp.pt)

Mestrado em Energias Sustentáveis  
Departamento de Engenharia Mecânica



novembro de 2018



*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*(Martin Luther King).*



## *Agradecimentos*

A realização desta tese de mestrado contou com o incentivo e ajuda do qual sou imensamente grata, sem os quais não tornaria realidade este trabalho.

A minha orientadora Doutora Nídia Sá Caetano, que foi a minha base de questionamentos, indagações e explicações, prestada em todo o trabalho.

Ao Engenheiro Cláudio Silva, que com dedicação e carinho me deu total apoio, disponibilidade, opiniões e críticas que foram surgindo ao longo da investigação.

Aos professores que fortaleceram e construíram mais meu conhecimento.

Aos colegas de turma, que contribuíram muito para ultrapassar as dificuldades do dia a dia.

Não poderei nunca esquecer minha família que me entusiasmou e me fez chegar aqui, acreditando e incentivando-me sempre.

A Professora Nídia Caetano, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado pelo POCI-01-0145-FEDER-006939, Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

Este trabalho foi cofinanciado pela FCT, CIETI – Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial, UID/EQU/00305/2013.



## *Resumo*

Além da importância ecológica das algas, elas apresentam grande participação em atividades industriais e econômicas para o homem. As microalgas são matérias-primas de grande interesse no presente para o cenário energético. Devido ao seu crescimento rápido e com alta concentração de lipídios na sua biomassa os torna uma excelente fonte de biodiesel. As microalgas são organismos fotossintéticos com grande eficiência e rendimento. A luz é essencial para fotossíntese destes organismos, que conseqüentemente interfere no crescimento destas microalgas onde as condições ótimas de iluminação possibilita alcançar economicamente taxas fotossintéticas máximas. Neste estudo, foram investigados os efeitos de intensidade, o fotoperíodo, o comprimento de onda e o efeito intermitente da luz LED, ocorrência provocada pela reação clara e escura no ciclo da fotossíntese, na produção de biomassa de algas verdes *Chlorella*. A produtividade de biomassa e o consumo de energia foram monitorados em experimentos controlados usando vários níveis de fluxo de fótons intermitentes para adaptar os recursos de luz necessária às células de microalgas sincronizadas com seus ciclos fotossintéticos, onde o "desperdício" de fótons será minimizado, aumentando, portanto, a eficiência fotossintética e produtividade de microalgas.

**Palavras-Chave-** Luz intermitente, microalgas, taxa de crescimento.



## *Abstract*

Besides the ecological importance of algae, they have a great participation in industrial and economic activities for man. Microalgae are raw materials of great interest in the present for the energy scenario. Due to its fast growth and high concentration of lipids in its biomass makes them an excellent source of biodiesel. Microalgae are photosynthetic organisms with great efficiency and yield. Light is essential for photosynthesis of these organisms, which consequently interferes with the growth of these microalgae where optimum lighting conditions make it possible to reach maximum photosynthetic rates economically. In this study, the effects of intensity, photo period, wavelength and the intermittent effect of LED light were investigated. This was caused by the light and dark reaction in the photosynthesis cycle in the production of *Chlorella* green algae biomass. Biomass productivity and energy consumption were monitored in controlled experiments using various intermittent photon flux levels to adapt the light resources required to microalgae cells synchronized with their photosynthetic cycles where photon "waste" will be minimized, thereby increasing photosynthetic efficiency and microalgae productivity.

**Keywords:** Growth rate, intermittent light, microalgae.



## *Résumé*

Outre l'importance écologique des algues, elles participent activement aux activités industrielles et économiques de l'homme. Les microalgues sont des matières-premières d'un grand intérêt dans le présent pour le scénario énergétique. En raison de sa croissance rapide et de sa forte concentration en lipides dans sa biomasse, il constitue une excellente source de biodiesel. Les microalgues sont des organismes photosynthétiques avec une grande efficacité et un bon rendement. La lumière est essentielle à la photosynthèse de ces organismes, ce qui nuit à la croissance de ces microalgues où des conditions d'éclairage optimales permettent d'atteindre économiquement des taux de photosynthèse maximaux. Dans cette étude, les effets ont été étudiés intensité, la photopériode et la longueur d'onde de la diode LED effet de clignotement, provoquée par l'apparition d'une réaction lumière et d'obscurité dans le cycle de la photosynthèse dans la production de biomasse de *Chlorella* algues vertes. La productivité de la biomasse et la consommation d'énergie ont été suivis dans des expériences contrôlées en utilisant différents niveaux de flux de photons intermittent pour adapter les fonctions d'éclairage nécessaires aux cellules de microalgues synchronisées avec leurs cycles photosynthétiques où les « déchets » de photons sera réduite au minimum, augmentant ainsi l'efficacité photosynthétique et productivité des microalgues.

**Mots-clés :** Lumière intermittente, microalgues, taux de croissance.



## *Declaração*

Liza Maria Lanfranchi declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas, com identificação da fonte.

16 de novembro de 2018.

Assinatura



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>XIII</b>
<b>DECLARAÇÃO</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXIX</b>
2. ESTADO DE ARTE.....	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PRIMEIRO ENSAIO.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO SEGUNDO ENSAIO.....	57
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES DO PRIMEIRO E SEGUNDO EXPERIMENTO DOS GRUPOS A, B, C, D E E.....	103
7. CONCLUSÕES .....	129
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>131</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>139</b>
<b>ANEXO B. RESULTADOS DOS TESTES EFETUADOS</b> .....	<b>195</b>
<b>ANEXO C. CURVA DE CRESCIMENTO</b> .....	<b>197</b>
<b>ANEXO D. FOTOSSÍNTESE</b> .....	<b>199</b>



## Índice de Figuras

Figura 1 Representação esquemática do percurso de um fóton de luz.....	9
Figura 2 Representação esquemática do espectro visível. ....	10
Figura 3 Esquema do experimento .....	22
Figura 4 Composição luminosa espectral de painéis LED brancos utilizados durante a cultura de <i>C. zoofingensis</i> .....	23
Figura 5 Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio A.....	33
Figura 6 Produtividade do primeiro grupo de ensaio A. ....	34
Figura 7 Evolução do consumo diário de nitrato do primeiro grupo de ensaio A.....	35
.Figura 8 Demonstração da concentração do pigmento clorofila do ensaio A.....	37
Figura 9 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio A.....	38
<b>Figura 10</b> Demonstração da concentração do pigmento carotenóide do ensaio A.....	39
Figura 11 Taxa de crescimento primeiro grupo de ensaio B.....	40
Figura 12 Produtividade primeiro grupo de ensaio B. ....	41
Figura 13 Evolução do consumo de nitrato do ensaio B .....	42
Figura 14 Demonstração do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio B.....	44
Figura 15 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio B.....	45
Figura 16 Demonstração da concentração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio B .....	46
Figura 17 Taxa de crescimento dos ensaios A e B.....	47

Figura 18 Taxa de crescimento do ensaio A e B positiva. ....	48
Figura 19 Taxa de produtividade do ensaio A e B. ....	49
Figura 20 Consumo específico de nitrato do ensaio A e B. ....	50
Figura 21 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>a</i> ao longo do ensaio A e B. ....	52
Figura 22 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio A e B. ....	53
Figura 23 Demonstração da concentração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio A e B. ....	55
Figura 24 Taxa de crescimento do ensaio C. ....	58
Figura 25 Produtividade do segundo grupo de ensaio C. ....	60
Figura 26 Evolução do consumo de nitrato do ensaio C. ....	61
Figura 27 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>a</i> ao longo do ensaio C. ....	62
Figura 28 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio C. ....	63
Figura 29 Demonstração da concentração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio C. ....	64
Figura 30 Taxa de crescimento do segundo grupo de ensaio D. ....	66
Figura 31 Produtividade segundo grupo de ensaio D. ....	67
Figura 32 Demonstração do pigmento clorofila- <i>a</i> ao longo do ensaio D. ....	69
Figura 33 Demonstração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio D. ....	70
Figura 34 Demonstração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio D. ....	71
Figura 35 Evolução do consumo de nitrato do segundo grupo de ensaio D. ....	73

Figura 36 Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos reatores em triplicado do segundo grupo de ensaio E.....	74
Figura 37 Produtividade do segundo grupo de ensaio E. ....	76
Figura 38 Média e desvio padrão do consumo específico de nitrato nos reatores em triplicado do segundo grupo de ensaio E. ....	77
Figura 39 Demonstração do pigmento clorofila- <i>a</i> E. ....	79
Figura 40 Demonstração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio E. ....	80
Figura 41 Demonstração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio E. ....	81
Figura 42 Taxa de crescimento dos ensaios C, D e E. ....	84
Figura 43 Taxa de crescimento do ensaio C, D e E positiva. ....	84
Figura 44 Taxa de produtividade do ensaio C, D e E.....	90
Figura 45 Evolução do consumo diário de nitrato dos ensaios C, D e E.....	95
Figura 46 Evolução do consumo diário de nitrato positivo.....	96
Figura 47 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>a</i> ao longo do ensaio C, D e E.....	98
Figura 48 Demonstração da concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio C, D e E.....	100
Figura 49 Demonstração da concentração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio C, D e E.....	102
Figura 50 Taxa de Crescimento de todos os ensaios.....	107
Figura 51 Taxa de crescimento do primeiro e segundo grupo de ensaio A, B, C, D e E positiva.....	108
Figura 52 Média e desvio padrão da produtividade nos reatores em triplicado dos ensaios A, B, C, D e E.....	111

Figura 53 Produtividade positiva dos ensaios A, B, C, D e E.....	112
Figura 54Evolução do consumo de nitrato dos ensaios A, B, C, D e E. ....	115
Figura 55 Evolução do consumo de nitrato positivo dos ensaios A, B, C, D e E. ....	116
Figura 56 Demonstração dA concentração do pigmento clorofila- <i>a</i> ao longo do ensaio A, B, C, D, e E. ....	120
Figura 57 Demonstração dA concentração do pigmento clorofila- <i>b</i> ao longo do ensaio A, B, C, D, e E. ....	124
Figura 58 Demonstração dA concentração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio A , B, C, D, e E. ....	128
Figura 59 Curva de calibração da Abs220 e concentração do mitrato no aparelho Dr2800 .....	195
Figura 60 Correlação do Aparelho DR2800 e leitor de placas .....	196
Figura 61 Curva de crescimento de uma cultura microalgal.....	197
Figura 62 Representação esquemática do cloroplasto.....	199
Figura 63 Representação esquemática da mitocôndria .....	199
Figura 64 Representação esquemática do tilacóides .....	200
Figura 65 Representação esquemática do transporte de elétrons na reação fotoquímica. ....	201

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 - Tipos de pigmentos. ....	2
Tabela 2 Condições de iluminação relativas ao primeiro grupo de ensaio A e B. ....	25
Tabela 3 Condições de iluminação relativas ao segundo grupo de ensaios C, D e E.....	25
Tabela 4 Condições gerais do primeiro grupo de ensaio A e B. ....	26
Tabela 5 Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio A .....	27
Tabela 6 Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio B .....	27
Tabela 7 Densidade óptica pretendida do primeiro grupo de ensaio A e B. ....	27
Tabela 8 Cronograma do ensaio A. ....	27
Tabela 9 Cronograma do ensaio B. ....	28
Tabela 10 Condições gerais do primeiro grupo de ensaio C, D e E.....	28
Tabela 11 Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio C. ....	29
Tabela 12 Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio D. ....	29
Tabela 13 Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio E.....	29
Tabela 14 Densidade óptica pretendida do primeiro grupo de ensaio C, D e E.....	29
Tabela 15 Cronograma do ensaio C .....	30
Tabela 16 Cronograma do ensaio D .....	30
Tabela 17 Cronograma do ensaio E.....	30
Tabela 18- Concentração dos macro e micronutrientes contida na solução BBM.....	139

Tabela 19- Diferentes regimes de luz dos experimentos. Último dia de cultivo, tempo PPFD ( $PPFD_{av}$ ), duração e PPFD em ambos os períodos de alta luz e baixa luz e a proporção entre o PPFD em período de luz baixa e alta ( $PPFD_L / PPFD_H$ ).....	140
Tabela 20 Concentração do peso seco do ensaio A .....	141
Tabela 21 Concentração do peso seco após tratamento de dados. ....	142
Tabela 22 Resumo da taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio A. ....	142
Tabela 23 Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio A .....	143
Tabela 24 Produtividade do ensaio A .....	143
Tabela 25 Média e desvio padrão da produtividade do ensaio A.....	144
Tabela 26 Concentração do nitrato do ensaio A. ....	145
Tabela 27 Concentração de nitrato após tratamento de dados do ensaio A. ....	145
Tabela 28 Evolução do consumo de nitrato diário do ensaio A.....	146
Tabela 29 Média e desvio padrão da evolução de consumo de nitrato do ensaio A.....	146
Tabela 30Concentração do peso seco do ensaio B.....	147
Tabela 31 Concentração do peso seco após tratamento de dados do ensaio B. ....	147
Tabela 32 Taxa de crescimento do ensaio B. ....	148
Tabela 33 Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio B. ....	148
Tabela 34 Produtividade do ensaio B.....	149
Tabela 35Média e desvio padrão do ensaio B .....	149
Tabela 36 Resumo da concentração de nitrato do primeiro grupo de ensaio B apos tratamento de dados. ....	150
Tabela 37 Resumo da evolução do consumo diário nitrato do primeiro grupo de ensaio B .....	151

Tabela 38 Média e desvio padrão da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio B151	
Tabela 39 Concentração do peso seco do ensaio C. ....	152
Tabela 40 Concentração do peso seco após tratamento de dados do ensaio C .....	152
Tabela 41 Taxa de crescimento do ensaio C.....	152
Tabela 42 média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio C.....	152
Tabela 43 Resumo da produtividade do ensaio C .....	153
Tabela 44 Média e desvio padrão da produtividade do ensaio C.....	153
Tabela 45 Resumo da concentração do nitrato do ensaio C.....	153
Tabela 46 Resumo da concentração de nitrato após o tratamento de dados do ensaio C..	154
Tabela 47 Resumo da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio .....	154
Tabela 48 Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato do ensaio C. ....	154
Tabela 49 Concentração do peso seco do ensaio D.....	155
Tabela 50 Concentração do peso seco do ensaio D após tratamento de dados. ....	155
Tabela 51 Resumo da taxa de crescimento do ensaio D.....	156
Tabela 52 Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio D. ....	156
Tabela 53 Resumo da produtividade do ensaio D. ....	157
Tabela 54 Média e desvio padrão da produtividade do ensaio D.....	157
Tabela 55 Resumo da concentração de nitrato do segundo grupo de ensaio D. ....	158
Tabela 56 Resumo da concentração de nitrato após tratamento de dados do grupo de ensaio D.....	158
Tabela 57 Evolução do consumo de nitrato diário do ensaio D .....	159
Tabela 58 Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato do ensaio D. ....	159

Tabela 59 Resumo da concentração do peso seco do ensaio E.....	160
Tabela 60 Concentração do peso seco após o tratamento de dados do ensaio E. ....	160
Tabela 61 Taxa de crescimento do ensaio E. ....	161
Tabela 62 Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio E. ....	161
Tabela 63 Resumo da produtividade do ensaio E. ....	162
Tabela 64 Média e desvio padrão da produtividade do ensaio E. ....	162
Tabela 65 Concentração de nitrato do ensaio E. ....	163
Tabela 66 Concentração de nitrato do ensaio E após tratamento de dados.....	164
Tabela 67 Evolução do consumo diário de nitrato do ensaio E. ....	164
Tabela 68 Média e desvio padrão da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio E. .....	165
Tabela 69 Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados A e B.....	166
Tabela 70 Média e desvio padrão a produtividade dos resultados A e B.....	166
Tabela 71 Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato dos resultados A e B .....	167
Tabela 72 Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados C, D e E.....	168
Tabela 73 Média e desvio padrão da produtividade dos resultados C, D e E.....	169
Tabela 74 Média e desvio padrão do consumo de nitrato dos resultados C, D e E. ....	170
Tabela 75 Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados A, B, C, D e E.	171
Tabela 76 Média e desvio padrão da produtividade dos resultados A, B, C, D e E.....	172
Tabela 77 Evolução do consum diário de nitrato dos resultados A, B, C, D.....	173
Tabela 78 Resumo do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio A.....	174

Tabela 79 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> no ensaio A.....	175
Tabela 80 Resumo do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio A .....	175
Tabela 81 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> no ensaio A.....	175
Tabela 82 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio A .....	176
Tabela 83 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide do ensaio A .....	176
Tabela 84 Resumo do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio B .....	177
Tabela 85 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> no ensaio B.....	177
Tabela 86 Resumo do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio B .....	178
Tabela 87 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> no ensaio B.....	178
Tabela 88 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio B .....	179
Tabela 89 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide do ensaio B .....	179
Tabela 90 Resumo do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio D.....	180
Tabela 91 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> no ensaio D.....	180
Tabela 92 Resumo do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio D.....	181
Tabela 93 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> no ensaio D.....	181
Tabela 94 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio D.....	182
Tabela 95 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio D.....	182
Tabela 96 Resumo do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio E.....	183
Tabela 97 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> no ensaio E.....	183
Tabela 98 Resumo do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio E.....	184
Tabela 99 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> no ensaio E.....	184

Tabela 100 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio E. ....	184
Tabela 101 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio E. ....	185
Tabela 102 Resumo da média e desvio padrão da clorofila- <i>a</i> dos ensaios A e B.....	186
Tabela 103 Resumo da média e desvio padrão da clorofila- <i>b</i> dos ensaios A e B.....	186
Tabela 104 Resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios A e B.....	187
Tabela 105 Resumo do pigmento clorofila- <i>a</i> do ensaio C.....	188
Tabela 106 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> no ensaio C.....	188
Tabela 107 Resumo do pigmento clorofila- <i>b</i> do ensaio C.....	188
Tabela 108 Média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> no ensaio C.....	188
Tabela 109 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio C. ....	188
Tabela 110 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio C. ....	188
Tabela 111 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> dos ensaios C, D e E. ....	189
Tabela 112 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> dos ensaios C, D e E. ....	190
Tabela 113 Resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios C, D e E. ....	191
Tabela 114 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>a</i> dos ensaios A, B, C, D.....	192
Tabela 115 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila- <i>b</i> dos ensaios A, B, C, D e E. ....	193
Tabela 116 Resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios A, B, C, D e E. ....	194

## *Nomenclatura*

$A / V$	Proporção de área iluminada para volume de cultura.	$L^{-1}$
$\mu_{pred}$	Taxa de crescimento específica prevista	$\mu, d^{-1}$
$[NO_3^-]_0$	Concentração de nitrato no tempo 0	$mgNO_3^-/gdw$
$[NO_3^-]_f$	Concentração de nitrato após um intervalo de tempo	$mgNO_3^-/gdw$
$A$	Área	$m^2$
$c_p$	Iluminância	$lm\ m^{-2}$ ou lx
$DW$	Concentração de peso seco de biomassa liofilizada	$gdw\ L^{-1}$
$dp$	Desvio padrão	
$F$	Frequências	Hz
$f_h$	Fração do ciclo de iluminação (24 h) do período de alta luz (H)	
$f_l$	Fração do ciclo de iluminação (24 h) do período de baixa luz (L)	
$H$	Alta luz	
$I$	Irradiância	$W/m^2$
$II$	Intensidade luminosa	cd
$L$	Baixa luz	
$nm$	Nanometro	nm

P	Peso	g
P	Produtividade de biomassa	$\text{g L}^{-1} \text{s}^{-1}$
<i>PPFD</i>	Densidade do fluxo de fótons	$\mu\text{Es}^{-1} \text{m}^{-2}$
<i>SNC</i>	Consumo específico de nitrato	$\text{mgNO}_3^-/\text{gdw}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
<i>t</i>	Tempo	s
$t_0$	Tempo no início da experiência	s
$t_f$	Tempo final da experiência	s
V	Volume	mL
$X_0$	Concentração da biomassa no início do tempo $t_0$	$\text{gdw L}^{-1}$
$X_f$	Concentração da biomassa DW no final da experiência $t_f$	$\text{gdw L}^{-1}$
$Y_{X,E}$	Rendimento da biomassa em energia leve	
$\Delta t$	Intervalo de tempo	(s)
$\mu$	Taxa de crescimento específico	$\mu, \text{d}^{-1}$
$\mu_H$	Taxa do crescimento sobre alta luz	$\mu, \text{d}^{-1}$
$\mu_L$	Taxa do crescimento sobre baixa luz	$\mu, \text{d}^{-1}$
ph	fotoperíodo	$\text{h d}^{-1}$
DO	Densidade óptica	abs
DW	Concentração de peso seco de biomassa liofilizada	$\text{gdw L}^{-1}$
$\text{PPFD}_{\text{av}}$	PPFD calculado em tempo em PBRs e A/V é a proporção de área iluminada para volume de cultura	

## Abreviaturas

<i>C. zofingiensis</i>	<i>Chlorella zofingiensis</i>
ADP	Adenosina difosfato
ATP	Adenosina trifosfato
C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
DO	Densidade óptica
FAME	Acidos graxos
H <sub>2</sub> O	Água
NADP <sup>+</sup>	Fosfato de nicotinamida adenina dinucleotídeo
OP	Caminho óptico
P680	Foto sistema 2
P700	Foto sistema 1
PAR	Radiação ativa fotossintética
PBR	Fotobiorreatores
PE	Eficiência fotossintética
PPFD	Densidade de fluxo fotônico fotossintético
PSI	Foto sistema 1
PSII	Foto sistema 2



# 1. Introdução

## 1.1. Microalgas

O termo microalgas engloba microrganismos algais com clorofila e outros pigmentos fotossintéticos. Apesar das diferenças estruturais e morfológicas entre os representantes de cada divisão, esses são fisiologicamente similares e são capazes de realizar fotossíntese oxigênica (Raven, et al., 1999) (Walker, et al., 2005).

Esses microrganismos podem crescer rapidamente e vivem em condições adversas porque possuem estruturas unicelulares ou multicelulares simples, incluindo as microalgas procarióticas (ex. *Cyanobacteria*, *Cyanophyceae*), microalgas eucarióticas (ex. algas verdes, *Chlorophyta*) e diatomáceas (*Bacillariophyta*) (Wang, et al., 2008). Por este motivo, as microalgas estão presentes em todos os ecossistemas existentes na Terra, e não apenas aquáticos, mas também terrestres, representando uma grande variedade de espécies vivendo em uma ampla gama de condições ambientais. São principalmente encontradas no meio marinho, em água doce e no solo, e são consideradas responsáveis por pelo menos 60 % da produção primária da Terra. Estima-se a existência de mais de 50 mil espécies, mas apenas um número limitado (cerca de 30 mil) foi estudado e analisado (Chisti, 2008), (Mata, et al., 2010).

As microalgas podem ser classificadas em cinco Filos, que se distinguem

fundamentalmente pela coloração e pela natureza das substâncias de reserva que apresentam (Anon., 2009).

Filo *Cyanophyta* ou *Cyanobacteria* (algas azuis) - Apresenta tonalidades azuis ou arroxeadas. Não existe núcleo organizado nem plastos e os pigmentos ocorrem em lamelas fotossintéticas na periferia do citoplasma.

Filo *Chlorophyta* (algas verdes) - Apresentam plastos verdes e a principal reserva é o amido acumulado no interior dos plastos sob a forma de grânulos dispersos ou removidos a volta de uma zona diferenciada do plastos. A espécie *Chlorella*, pertencente ao reino Plantae, divisão chlorophyta, classe Trebouxiophyceae, ordem Chlorellales, família Chlorellaceae, gênero *Chlorella* e espécie *Chlorella* sp. e *Chlorella* m. (Technology, 2018).

Filo Euglenophyta - Os plastos são verdes e a principal substância de reserva é o paramilo extaplastidial, que é uma substância semelhante ao amido, de cor amarelo-claro com soluto de Lugol.

Filo *Rhodophyta* (algas vermelhas) - Os plastos são avermelhados ou arroxeados, podendo apresentar coloração azulada ou verde azeitona. Sua principal reserva é o amido florídeo, que distribui pelo citoplasma e cor acastanhado com o soluto de Lugol. Geralmente são algas marinhas.

Filo *Chromophyta* (algas castanhas, douradas e amarelo-esverdeadas) - Podem ter plastos castanhos, dourados ou amarelados. Sua reserva é o lipídio.

A Tabela 1 mostra os pigmentos fotossintéticos.

**Tabela 1 - Tipos de pigmentos.**

Filo	Pigmentos fotossintéticos	Produtos de armazenamento
Cyanophyta	Clorofila- <i>a</i> , Ficobilinas.	Amido, cianoficina
Chlorophyta	Clorofila- <i>a</i> e - <i>b</i> , Carotenóides.	Amido, celulose
Euglenophyta	Clorofila- <i>a</i> e - <i>b</i> , Carotenóides.	Amido, celulose
Rhodophyta	Clorofila- <i>a</i> e - <i>d</i> , Carotenóides, Ficobilinas.	Amido
Chromophyta	Clorofila- <i>a</i> e - <i>c</i> , Carotenóides.	Laminarina, óleo

As *Chlorophyta* ou algas verdes apresentam um grande grupo de organismos com uma grande variabilidade morfológica, microscópica e macroscópica formas. Compreendem quatro classes: *Micromonadophyceae*, *Charophyceae*, *Ulvophyceae* e *Chlorophyceae*. e podem acumular pigmentos como clorofila-*a* e *b* e  $\beta$  – carotenos e xantofilas e podem ser sintetizados e acumulados fora do cloroplasto sob condições de deficiência de nitrogênio e/ou outros estresses, coloração a alga laranja ou vermelha. O produto de armazenamento é amido (glucano ligado a 1,4), composto de amilose e amilopectina. Ao contrário das outras algas, é formado dentro do cloroplasto. As paredes celulares geralmente contêm celulose. São principalmente de água doce, mas um grande número cresce em recursos marinhos. A exploração comercial de algas verdes microscópicas compreende relativamente poucos gêneros clorofáceos entre os quais estão *Chlorella*, *Dunaliella* e *Haematococcus*. Além disso, *Botryococcus braunii* foi proposto e cultivado como fonte renovável de combustível líquido

## **1.2. Produtos e aplicações**

As microalgas são uma fonte rica lipídios na sua biomassa, que pode ser convertida em biocombustível.

Como se vê, são diversos os produtos que a biomassa algal pode gerar, incluindo diversos biocombustíveis, a geração de energia eléctrica, e a produção de combustíveis mais tradicionais como o gás de síntese (mistura de hidrogênio e dióxido de carbono) e o carvão (Brennan & Owende, 2010).

Estas têm maior produtividade de biomassa que as culturas terrestres uma vez que necessitam de menor área de cultivo e têm o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa.

Além destas aplicações, estas podem reduzir a carga ambiental de efluentes de uma unidade industrial, já que estes podem ser utilizados como meio de cultura das microalgas, desde que as suas características químicas e biológicas não ponham em causa o crescimento celular nem a aplicação do produto fina.

O requisito básico para o crescimento básico deve incluir dióxido de carbono, macro e micronutrientes, bem como a luz. A fonte de carbono pode ser obtida a partir do gás carbonico (CO<sub>2</sub>) atmosférico ou pode ser obtida a partir de efluentes gasosos libertados

pela indústria (Huang, et al., 2010).

Seu subproduto pode ser convertido em fertilizante ou alimentos para gado, resultando um fator essencial para a sustentabilidade. As microalgas constituem uma fonte natural de uma variedade de medicamentos para aplicações farmacêuticas, alimentares e cosméticas.

O crescimento é definido como o aumento da matéria viva, usualmente o número de células para microorganismos unicelulares ou a biomassa total para organismos multicelulares (Tomaselli, 2004).

Maiores detalhes sobre a curva de crescimento encontram-se no Anexo C

Microalgas surgiram como promissoras matérias-primas de biomassa para a economia de base biológica. Sua capacidade de utilizar eficientemente o dióxido de carbono e a energia solar para produzir biomassa rica em óleos, proteínas e polissacarídeos, acumulando compostos de alto valor como carotenóides, vitaminas e ácidos graxos poliinsaturados (Mata, et al., 2010), aumentou o interesse da sua utilização como matéria-prima para produção dos biocombustíveis, alimentação, indústrias farmacêuticas e cosméticas (Pulz & Gross, 2004), (Borowitzka, 2013).

As microalgas tanto podem ser autotróficas, se forem fotossintéticas, como heterotróficas, se não o forem. Existem microalgas procaríotas (cianobactérias) e eucariotas onde se encontram as espécies de algas mais comuns (Rosa, 2011). As microalgas são fáceis de cultivar e de se reproduzir, uma vez que crescem com pouca ou até mesmo sem nenhuma atenção, utilizando água imprópria para consumo humano, retirando os nutrientes contidos na mesma.

Assim, as microalgas são uma fonte comercial estabelecida de alimentos, rações e produtos químicos de alto valor para vários mercados (Fatih Demirbas, 2009). No entanto, apesar da pesquisa exaustiva no campo feita nas últimas décadas, os biocombustíveis produzidos pela biomassa de microalgas ainda não são uma realidade. Como um produto de baixo custo, os biocombustíveis de microalgas ainda não são rentáveis.

O conceito de biorrefinaria de microalgas, com a coprodução de compostos valiosos por microalgas (como os carotenóides) em uma instalação de produção de biocombustível, poderia aumentar a viabilidade econômica do processo (Stephens, et al., 2010).

Quando cultivada fotoautotroficamente, a *Chromochloris zofingiensis* (*C. zofingiensis*) acumula quantidade significativa de carotenóides valiosos, a saber, astaxantina e luteína, exibindo altas taxas de crescimento e alta população celular. (Del Campo, et al., 2004). Além disso, *C. zofingiensis* também revelou a capacidade de acumular quantidade significativa de lipídios, carboidratos e proteínas o que a torna uma candidata adequada para uma biorrefinaria. Carotenóides de microalgas foram produzidos com sucesso em grande escala após um processo de cultivo em duas etapas:

- 1) Um estágio verde, onde a produção de biomassa é otimizada.
- 2) Um estágio de indução, onde condições de estresse são aplicadas para induzir o acúmulo de carotenóides por microalgas. Em ambas as etapas, o fornecimento de luz é um parâmetro-chave de processamento, influenciando o desenvolvimento e a composição da biomassa (Hu, 2004), (Carvalho, et al., 2011).

Durante o período de cultivo, as microalgas são expostas a mudanças no ambiente de luz devido às variações diárias de intensidade e ciclos dia / noite. Foto-aclimação é o termo referente à capacidade das microalgas se adaptarem a essas mudanças ocasionando a otimização do uso da luz. Mudanças no perfil do pigmento ocorrem como resposta a variações dos níveis de luz. Microalgas aclimatadas a pouca luz geralmente exibem alto conteúdo de clorofila (Hu, 2004). Inversamente, quando aclimatados a altas irradiâncias, as microalgas tendem a acumular carotenóides, elevando a relação carotenóides, clorofila, que protege o centro de reação das unidades foto-sistêmicas (Margalith, 1999).

Tanto a intensidade da luz quanto o fotoperíodo foram relatados como afetando o conteúdo de clorofilas e  $\beta$ -caroteno de *Dunaliella salina* (Ben-Amotz & Avron, 1983) e o conteúdo de astaxantina de *Haematococcus pluvialis* (Kobayashi, et al., 1992). (Orosa, et al., 2000), demonstram que o acúmulo de astaxantina por *Neochloris wimmeri*, *Scenedesmus vacuolatus*, *Scotiellopsis oocistiformis*, *Chromochloris zofingiensis* e *Protosiphon botryoides* foi diretamente induzido por alta intensidade luminosa. Estudos mostraram que a intensidade da luz e o fotoperíodo também influenciam o polissacarídeo de microalgas (Tredici, et al., 1991), e o teor de óleo (Sukeni, et al., 1989), Tal influência no crescimento torna vital o estudo do fotoperíodo e da intensidade luminosa para atingir as produtividades ótimas da biomassa de microalgas e seus subprodutos valiosos.

Em relação à *C. zofingiensis*, nunca foi conduzido um estudo sistemático do efeito do

fotoperíodo e da intensidade luminosa sobre o crescimento e perfil do pigmento. Portanto, o objetivo deste estudo foi caracterizar o crescimento de *C. zofingiensis* sobre diferentes fotoperíodos e intensidades luminosas. Seu efeito no teor de pigmentos, morfologia celular e consumo de nutrientes também foi avaliado. Um experimento com iluminação modulada com ciclo de 24 h também foi conduzido para fornecer uma visão do crescimento de *C. zofingiensis* sob estas condições.

### **1.3. Organização da dissertação**

Esta dissertação encontra-se organizada em 7 capítulos. No capítulo 1, foi feita a introdução ao problema, tendo sido apresentada uma breve descrição das microalgas e das suas potenciais aplicações, a que se seguiu a apresentação de uma microalga particular (a *C. zofingiensis*) e a constatação de uma lacuna de conhecimento a ela associado, o que motivou o estudo desta dissertação. No capítulo 2, foi feita a caracterização do Estado de Arte. No capítulo 3, foram apresentados os materiais e métodos; no capítulo 4 apresentam-se os resultados e discussões do primeiro grupo de ensaio; no capítulo 5 foram apresentados os resultados e discussões do segundo grupo de ensaio; no capítulo 6, são apresentadas os resultados e discussões do primeiro e segundo experimento, e finalmente no capítulo 7 as conclusões deste trabalho e as limitações encontradas, fazendo-se algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 2. Estado de arte

A microalga *Chlorella* contém os pigmentos verdes foto sintetizadores, clorofila-*a* e -*b* em seu cloroplasto. Através da fotossíntese se multiplica rapidamente requerendo só dióxido de carbono, água, luz solar, e pequenas quantidades de minerais, para reproduzir-se.

Um dos fatores cruciais para a taxa de crescimento de microalgas é o efeito da luz, nomeadamente a intensidade, o fotoperíodo, o comprimento de onda e o efeito intermitente (Wang, et al., 2014). No entanto, aproveitar estas características requer uma compreensão completa da luz como um dos parâmetros fundamentais no cultivo de microalgas (Wang, et al., 2014). Um desses parâmetros é o ciclo circadiano, que inclui variação de luz e temperatura em ciclos de 24 h. O outro é o ciclo sazonal que varia de acordo com o clima e localização geográfica do habitat particular em que as algas estão crescendo.

Aclimação as respostas observadas incluem a alteração do complexo de colheita de luz, síntese e degradação em resposta a mudanças na qualidade e intensidade da luz. Neste processo, as células das microalgas passam por mudanças dinâmicas na composição celular, juntamente com alterações nas propriedades ultraestruturas, biofísicas e fisiológicas para aumentar a fotossíntese e o crescimento de algas (Dubinsky & Matsukama, 1995).

A resposta a estímulos ou mudanças em seu ambiente é uma característica inerente de

qualquer organismo vivo. As mudanças nas condições ambientais podem, portanto, ser definidas com base na resposta que a célula sofre como resultado da mudança detectada seja um fator de limitação ou de estresse. Por simplicidade, definimos um fator limitante como aquele que determina a taxa de crescimento ou reação bioquímica, e que uma mudança em seu nível resultará em uma alteração na taxa sem qualquer requisito para um processo de aclimação. O estresse será assim definido como uma condição ambiental que resulte em um desequilíbrio metabólico que requer ajustes metabólicos e bioquímicos antes que um novo estado de crescimento estável possa ser estabelecido.

A otimização de condições de crescimento em culturas para produção em massa requer necessariamente um conhecimento do destino da energia da luz dentro do aparelho fotossintético. Os efeitos da luz sobre a composição bioquímica das algas fotossintéticas são em grande parte controlados pelo processo chamado foto-aclimação ou foto-adaptação.

A mobilidade inerente das microalgas, mas também o movimento imposto pela mistura e a aeração, as expõe a uma irradiação variável que não ocorrem na natureza. Devido à existência de zonas iluminadas e escuras em foto biorreatores (PBR), as microalgas são expostas de forma intermitente à luz, um efeito também conhecido por "luz piscando". O efeito de luz intermitente na fotossíntese foi estudado desde que a própria microalga e seu efeito vantajoso sobre a eficiência fotossintética foram reconhecidos há muito tempo, (Emerson & Arnold, 1932a). No entanto, nos últimos anos, o efeito de luz intermitente ganhou maior relevância como parâmetro no cultivo de microalgas e surgiram novos estudos relacionados ao controle desse efeito e melhorias em produtividades. Os antecedentes teóricos do efeito de luz intermitente serão apresentados nesta revisão, bem como o progresso alcançado até agora para avaliar o efeito sobre as produtividades de microalgas.

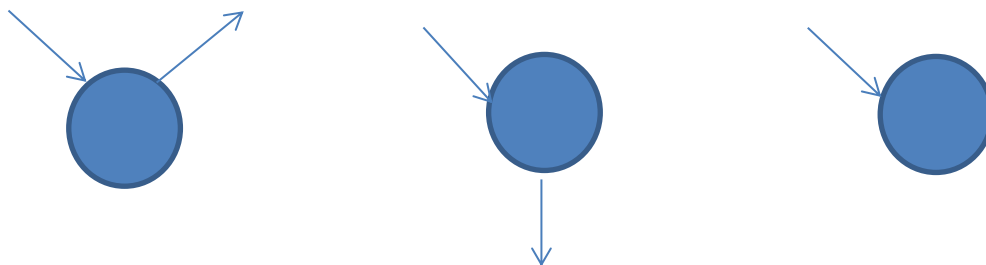
## **2.1. Fotossíntese e prazos**

### **2.1.1. Luz**

A luz incide em um determinado intervalo de comprimento de onda dentro do qual o olho humano é sensível, (400 a 700 nm) chamada de luz visível, é uma forma de radiação eletromagnética, constituída por partículas energéticas denominadas fótons. As unidades radiométricas são usadas para caracterizar as propriedades físicas da radiação

eletromagnética, a densidade de fluxo de fótons (pacotes de luz, quanto maior o comprimento de onda maior é a energia) (PPFD) e irradiância, geralmente relatada em  $\mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$  e  $\text{Wm}^{-2}$ , respectivamente. A intensidade luminosa (medida em cd), a iluminância (medida em  $\text{lm m}^{-2}$  ou lx) e as quantidades relacionadas, comumente usadas para caracterizar lâmpadas para fins de iluminação, não são adequadas para definir a iluminação em estudos de microalgas. Como a fotossíntese é um processo baseado em fótons, a PPFD, expressa em ( $\mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) é a quantidade mais apropriada para definir e comparar fontes de iluminação. Quando relatado apenas para a radiação ativa fotossintética (PAR), isto é, a radiação utilizável na fotossíntese, que designa a faixa espectral de radiação entre 400 a 700 nm, a designação da densidade de fluxo fotônico fotossintético (PPFD) pode ser aplicada.

Para que um fóton seja considerado ativo no processo biológico, ele precisa ser absorvido por uma molécula e que tenha energia suficiente para executar o trabalho químico exigido. O fóton quando encontra uma molécula pode ser refletido, pode ser atravessado ou ainda pode ser absorvido por esta molécula. A Figura 1 representa o percurso de um fóton de luz no processo biológico.



**Figura 1 - Representação esquemática do percurso de um fóton de luz**

Cada comprimento de onda absorvido por uma molécula é específico daquele tipo de molécula. Para a energia luminosa da região do espectro da luz visível ser utilizada pelos sistemas vivos ela deve ser absorvida por moléculas específicas, denominadas pigmento. Quando um feixe de luz branca incide sobre um pigmento, certos comprimentos são absorvidos e o restante dispersado ou transmitido representado na Figura 2.

Os comprimentos de onda que não são absorvidos fazem o pigmento visível para o nosso olho. Os pigmentos que absorvem todo comprimento de onda são negros. A clorofila parece verde, pois absorve comprimento de onda no azul e vermelho, por isto enxergamos como verde que é a luz refletida. Os organismos fotossintetizantes possuem uma variedade de pigmentos o que permite uma diferente absorção de comprimentos de onda de luz

visível possibilitando assim um melhor aproveitamento da energia luminosa.

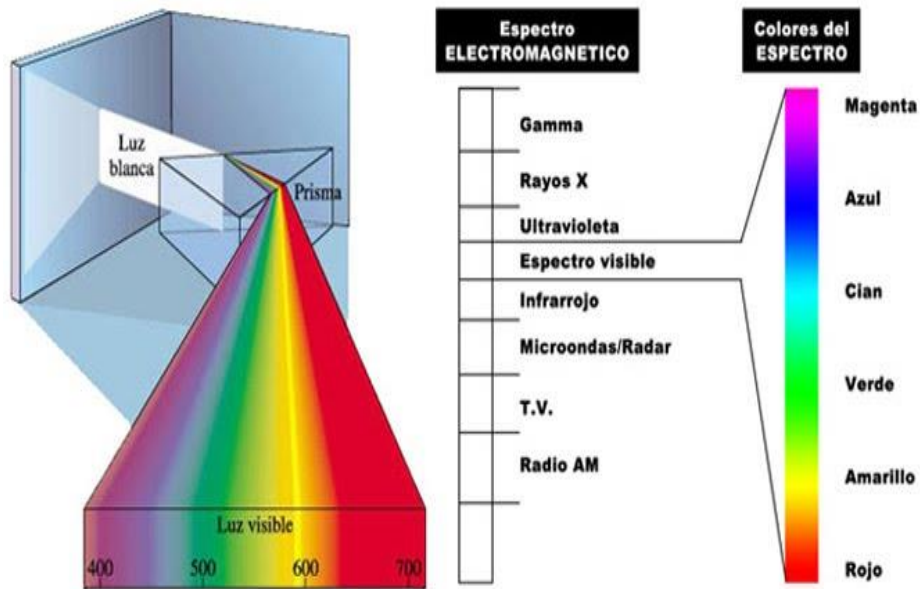
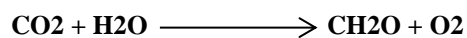


Figura 2 - Representação esquemática do espectro visível

### 2.1.2. Fotossíntese

Na fotossíntese, a energia luminosa é convertida em energia química contida nas moléculas orgânicas. A vida na terra depende da energia proveniente do sol, onde o único processo biológico capaz de aproveitar esta energia é a fotossíntese, que significa síntese utilizando a luz. Os organismos fotossintetizantes utilizam a energia luminosa, seja ela natural ou artificial, para sintetizar carboidratos (glicose), a partir de substâncias simples encontrada na natureza como o CO<sub>2</sub> e a água, resultando a liberação de oxigênio.



A partir da energia luminosa, estes organismos produzem seu alimento (foto autotrófia). A luz é vital no processo neste processo.

O detalhamento do processo da fotossíntese encontra-se no anexo D.

### 2.1.3. Requisitos de fotossíntese *timescales*

As moléculas de clorofila são excitadas do estado fundamental em menos de 10<sup>-15</sup> s. Para iniciar a reação em cadeia da fotossíntese, a produção de um par separado de carga deve ocorrer em menos de 10<sup>-8</sup> s o tempo a partir do qual ocorre a fluorescência (o processo de

excitação mais rápido) (Noomnarm & Clegg, 2009).

O tempo de rotatividade da fotossíntese é estimado em ordem de milissegundos (Falkowski, et al., 1981), (Zarmi, et al., 2013) e é definido como o tempo decorrido entre a absorção dos fótons necessários para completar um ciclo fotossintético e o momento em que o (PSII) está pronto para absorver os fótons de novo. Qualquer fóton absorvido dentro do tempo de rotatividade não será usado na fotossíntese e, portanto, será desperdiçado. Os tempos estimados de rotatividade revelam claramente que as reações escuras são o passo limitante da fotossíntese. Entender esses tempos parece ser crucial para obter alta eficiência fotossintética (PE) e produtividades elevadas. Ao adaptar os recursos de fornecimento de luz e PBRs para fornecer a quantidade de luz necessária às células microalgicas sincronizadas com seus ciclos fotossintéticos, o "desperdício" de fótons será minimizado, aumentando, portanto, a eficiência fotossintética (PE) e produtividade de microalgas. Várias experiências foram feitas nas últimas décadas para determinar os prazos da fotossíntese. As experiências feitas com reatores de luz pulsada e estreitos mostraram que é possível atingir alta produtividade de microalgas ajustando os tempos de exposição das células microalgais ao fornecimento de luz.

#### **2.1.4. Efeito de luz intermitente**

A fotossíntese pode ser expressa como uma reação redox conduzida por energia de luz (colhida por moléculas de clorofila), em que o dióxido de carbono e a água são convertidos em carboidratos e oxigênio. A conversão é tradicionalmente dividida em dois estágios, as chamadas reações de luz e reações escuras. Nas reações leves, que estão ligadas às membranas fotossintéticas, a energia da luz é convertida em energia química fornecendo um NADPH redutor bioquímico e um ATP composto de alta energia. Nas reações escuras, que ocorrem no estroma, NADPH e ATP são utilizados na redução bioquímica sequencial de dióxido de carbono para carboidratos.

A descrição clássica da atividade fotossintética é baseada em medidas da evolução do oxigênio em proporção à intensidade da luz, a chamada resposta da luz. Tradicionalmente, a luz tem sido referida como o principal fator limitante em massa cultura de microalgas (Kok, 1953).

O efeito da luz intermitente tem sido usado para estudar processos fotossintéticos desde há muito tempo. As primeiras experiências que mostram que fornecer luz intermitente poderia

aumentar a taxa fotossintética foram feitas no início do século passado por (Brown, et al., 1905) que estudaram a fotossíntese das folhas. Warburg, em 1919 foi o primeiro a testar a luz intermitente com microalgas *Chlorella*

(Emerson & Arnold, 1932a). Seus resultados não deixaram dúvidas sobre o aumento da eficiência fotossintética sobre a luz intermitente em comparação com o obtido com fornecimento contínuo de luz. Ele também descobriu que a frequência de piscamento foi determinante para as melhorias no rendimento fotossintético (Emerson & Arnold, 1932a) introduziram a técnica de medição da fotossíntese sobre os breves flashes de luz e foram os primeiros a propor uma teoria que seja à base da compreensão atual das reações fotossíntese. Com seus resultados em luz piscando com microalgas, eles concluíram que duas etapas estavam envolvidas na redução de CO<sub>2</sub>:

- 1) Uma reação clara e sem temperatura.
- 2) Uma reação escura, dependente da temperatura e exigindo um tempo relativamente longo para prosseguir.

Neste mesmo estudo, descobriram que a fotossíntese poderia ser realizada sob luz intermitente com flashes tão baixos quanto 10 µs, e que tempos escuros maiores que 40 ms a 25 °C e 400 ms a 1.1 °C não aumentariam a taxa de fotossíntese. Na sequência desse trabalho, e tentando quantificar o número necessário de moléculas de clorofila necessárias para reduzir uma molécula de CO<sub>2</sub> (que foi calculada para serem 2480 moléculas), (Emerson & Arnold, 1932b) usaram flashes de luz com uma intensidade de saturação tão baixa quanto 10 µs e relataram o tempo exato das reações escuras a 25 °C: 20 ms. Os experimentos de Emerson e Arnold foram replicados várias vezes (Weller, 1941), (Clendenning & Ehrmantraut, 1950), (Reike & Gaffron, 1943), mas os resultados relatados por (Tamiya & Chiba, 1949) pareciam contradizer os resultados com micro flashes. Suas experiências com *Chlorella ellipsoïda* sugeriram que Emerson e Arnold não atingiram a intensidade da saturação da luz, alcançando 3 vezes maiores rendimentos quânticos por quantidade de células do que os relatados por (Emerson & Arnold, 1932b) . No entanto, ao contrário de Emerson e Arnold, seu maior rendimento quântico foi obtido com flashes relativamente longos (> 6 ms). Isso pode ser explicado por uma questão técnica, sugerida posteriormente por (Myers & Graham, 1994), que o encurtamento do comprimento dos flashes reduziu a intensidade do pico. Algumas experiências relevantes feitas para descobrir as frequências ótimas e as frações iluminadas do ciclo para aumentar a

produtividade de biomassa de várias espécies de microalgas. A partir de suas experiências com *Chlorella*, (Kok, 1953) concluiu que PE em alta intensidade de luz é maior em luz intermitente, (Phillips & Myers, 1954) realizaram um estudo completo das taxas de produção de microalgas sob luz piscante com *Chlorella pyrenoidosa*. Eles obtiveram maiores taxas de crescimento das culturas de *Chlorella pyrenoidosa* sobre luz intermitente com a mesma intensidade média que aquelas sobre iluminação contínua. Eles variaram a intensidade média da luz variando o período do ciclo para cada tempo de flash. Para o tempo de flash de 1 ms, a curva da intensidade média da luz versus taxa de crescimento corresponde aproximadamente à curva de luz contínua. Para tempos de flash maiores (ou seja, 4 e 17 ms), as taxas de crescimento são inferiores às de iluminação contínua para intensidades de luz médias baixas, mas além da intensidade de saturação, a taxa de crescimento da luz intermitente foi ligeiramente maior do que a observada para a luz contínua. As intensidades de luz além dos níveis de saturação não foram testadas para o tempo de flash de 1 ms, o que torna impossível concluir com o estudo se as taxas de crescimento mais elevadas eram viáveis com intensidades mais elevadas.

(Kok, 1956), investigou os padrões de intermitência necessários para aumentar o rendimento de O<sub>2</sub> de fotossíntese de microalgas. (Kok, 1956) conseguiu utilizar ciclos com tempos escuros mais curtos do que (Emerson & Arnold, 1932a), o que lhe permitiu confirmar os resultados de (Emerson & Arnold, 1932a) quanto ao tamanho da unidade fotossintética e a independência de temperatura das reações de luz. Entre outros resultados, (Kok, 1956) também observou que, para a mesma intensidade média, a taxa de fotossíntese de microalgas vs. curva de intensidade de luz de flashes curtos de luz de 0,47 ms separados por tempos escuros de 1,43 ms coincide com a curva de luz contínua. Isso significa que as microalgas utilizadas neste estudo toleraram maiores intensidades de luz sob a luz intermitente do que a luz contínua antes que apareçam os efeitos da fotoinibição.

(Govindjee, 1965) estudou o efeito de flashes de luz monocromáticos com luz de fundo de diferentes comprimentos de onda na evolução de O<sub>2</sub> da microalga vermelha *Porphyridium cruentum*. Ele descobriu duas manifestações diferentes do aprimoramento na evolução de O<sub>2</sub> fotossintética:

- 3) Um aumento na taxa de evolução do O<sub>2</sub>.
- 4) Um prolongamento do tempo de evolução de O<sub>2</sub>.

Ele usou apenas tempos de flash de 50 ms com tempos escuros superiores a 20 s. Os

comprimentos de onda utilizados foram 695 nm (luz vermelha) e 555 nm (luz verde). (Govindjee, 1965) obteve dois tipos de aprimoramentos quando as microalgas foram iluminadas com flashes de luz vermelha com um fundo de luz verde. A exposição de microalgas a flashes verdes com fundo de luz vermelha apenas mostra aprimoramento na taxa de evolução de O<sub>2</sub>.

(Myers & Graham, 1971), apresentaram um relatório dirigido à repetição dos experimentos de Emerson e Arnold. Eles determinaram o tamanho da unidade fotossintética de *Chlorella pyrenoidosa* usando microfones flashes, chegando a uma série de valores na mesma ordem de (Emerson & Arnold, 1932b) e (Kok, 1956). O tempo de renovação fotossintética a 25 °C sob níveis de saturação também foi calculado entre 5,6 e 14,3 ms, variando consistentemente e inversamente com o tamanho de união fotossintética.

(Falkowski, et al., 1981) , também usaram luz piscando investigando a adaptação morfológica de microalgas em resposta a diferentes níveis de irradiação. Eles descobriram que o teor de clorofila e as proporções de clorofila-*a*, *b* e *c* em *Skeletonema costatum* e *Dunaliella tertiolecta* dependiam dos níveis de irradiância da luz intermitente. Eles calcularam o tempo de rotatividade para estar entre 19 e 6,2 ms e entre 7,9 e 4,5 para *Dunaliella tertiolecta* e *Skeletonema costatum*, respectivamente, para níveis de irradiância baixos e altos.

A partir de suas experiências com *Phaeodactylum tricornerutum* (uma diatomácea), (Terry, 1986), concluiu que a luz intermitente pode aumentar a eficiência fotossintética pela integração da intensidade da luz (isto é, a extensão da qual a fotossíntese progrediu após o flash). (Terry, 1986), descreveu um modelo para estabelecer a dependência quantitativa do aumento da taxa fotossintética da diatomácea marinha *Phaeodactylum tricornerutum* submetida à luz intermitente. Ele observou uma relação hiperbólica entre a integração da intensidade da luz e a taxa de piscamento, em que as altas taxas de flash resultaram em maior integração. No entanto, ele também afirmou que, para um determinado período de flash, ciclos de trabalho excessivamente curtos podem levar a um aumento reduzido em PE devido à respiração durante os períodos escuros prolongados. (Terry, 1986), também observou uma dependência do ciclo de trabalho ideal com o comprimento de períodos de luz e sombras e com a intensidade da fonte de luz. O tempo de renovação da fotossíntese obtida por ele foi à ordem de um segundo, muito mais longo do que o relatado pelos autores já citado.

(Sukenik, et al., 1987), estudaram o efeito da luz piscante em *Dunaliella tertiolecta*. Eles calcularam o tempo de rotatividade para ser 3,5 e 14,5 ms a 18 °C, para células adaptadas a irradiações altas e baixas, respectivamente. Com a diminuição da intensidade da luz, eles também relataram aumentos no teor de clorofila-*a*, bem como em todos os componentes do aparelho fotossintético. A partir de seus resultados, eles concluíram que a difusão do plastoquinol (uma molécula de quinona envolvida na cadeia de transporte de elétrons nas reações dependentes da luz da fotossíntese) não era limitante de taxa na fotossíntese, sendo seu tempo de difusão até uma ordem de magnitude inferior ao tempo de renovação. Eles sugerem que, em condições ideais, a fixação de carbono é o passo limitante da taxa de fotossíntese.

(Matthijs, et al., 1996) usaram LEDs para estudar o efeito da luz piscante monocromática no cultivo de *Chlorella pyrenoidosa*. Os LEDs vermelhos monocromáticos que atingiram um pico a 660 nm foram utilizados para gerar luz piscando de 2,5 a 25 kHz com tempo de piscamento fixo de 5 µs. O aumento das frequências intermitentes levou, como esperado, a taxas de crescimento mais altas, mas também a maior PE. (Matthijs, et al., 1996) também confirmou que a luz vermelha usada foi suficiente para suportar o crescimento de *Chlorella pyrenoidosa* e que a adição de luz azul não alterou as propriedades de crescimento.

(Nedbal, et al., 1996), estudaram os efeitos de LEDs vermelhos monocromáticos intermitentes (pico de emissão a 654 nm) em culturas diluídas (<20 µM de clorofila-*a*) de *Scenedesmus quadricaula*, *Chlorella vulgaris* e *Synechococcus elongatus*. Usando flashes curtos de 1 a 10 µs de comprimento dentro de ciclos intermitentes de 10 µs a 1 s, descobriram que as taxas de evolução de O<sub>2</sub> fotossintética eram menores ou iguais na luz intermitente em comparação com a taxa encontrada na irradiação média equivalente em luz contínua. No entanto, eles obtiveram maiores taxas de crescimento em luz intermitente para 1000 µE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> de irradiância média com períodos intermitentes de luz entre 1 a 10 ms em comparação com a luz contínua. (Nedbal, et al., 1996), encontraram taxas de fotoinibição mais baixas em luz intermitente em comparação com o regime de luz contínua. Eles propõem como uma explicação que a reoxidação parcial do pool de plastoquinona pode ocorrer durante o intervalo escuro.

(Grobbelaar, et al., 1996) , mediram a evolução do oxigênio a partir de *Scenedesmus obliquus* sob LEDs piscantes atingindo um pico a 660 nm com frequências variando de

0,05 a 5000 Hz e ciclos de serviço de 33 e 50%. As medidas de evolução do oxigênio foram feitas com culturas diluídas (cerca de 5 mg L<sup>-1</sup> de clorofila-*a*) e os resultados mostraram que as taxas de fotossíntese aumentaram com o aumento da frequência de flash, para ambos os ciclos de trabalho. Nenhuma influência de aclimatação a uma frequência de piscagem específica foi observada por (Grobbelaar, et al., 1996).

(Park & Lee, 2000) , usaram LEDs vermelhos piscantes com pico de emissão de 680 nm para estudar as taxas de produção de oxigênio em *Chlorella kessleri*. Eles descobriram que as luzes piscantes em culturas de alta densidade de *Chlorella kessleri* com frequências entre 10 e 50 kHz com tempos de piscamento entre 2 e 50 μs aumentaram as taxas de produção de oxigênio fotossintético em até 25% aumentando a penetração de luz na cultura (reduzindo o efeito de sombra mútua, uma vez que podem ser usadas irradiações maiores). Na sequência deste estudo, (Park & Lee, 2000), estudaram uma gama mais ampla de frequências piscantes (5 Hz a 37 kHz) com ciclos de trabalho entre 10 e 50% para o cultivo de culturas de alta densidade de *Chlorella kessleri*. Seus resultados mostraram que baixas frequências piscantes (menores de 1 kHz) levam a taxas de crescimento e produção de O<sub>2</sub> mais baixas que as realizadas sob luz contínua. Para uma frequência intermitente de 37 kHz, a concentração final da célula foi aumentada em 20% em comparação com o fornecimento contínuo de luz. Esses estudos levaram a outro (Park & Lee, 2000) onde os autores propõem um novo parâmetro operacional: densidade de célula crítica, calculada usando a concentração celular, volume celular médio e a relação superfície / volume de uma câmara de cultura, que indica a concentração celular máxima sem sombreamento mútuo na cultura.

(Katsuda, et al., 2008) , experimentaram luz de piscamento azul monocromática (faixa de emissão de comprimento de onda de 450 a 500 nm) para aumentar a produção de astaxantina por *Haematococcus pluvialis* que cresceu mixotroficamente, com intensidades relativamente baixas de 2 a 12 μE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, frequências de 25 a 200 Hz com 17 a 67% do ciclo de trabalho. Eles encontraram um aumento de peso celular sob luz piscante em comparação com a luz contínua para intensidades de luz até 8 μE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Para a acumulação de astaxantina, eles relataram a mesma concentração de astaxantina em *H. pluvialis* sob luz intermitente de 8 μE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e sob luz contínua de 12 μE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, o que resultou em redução no consumo de energia para 2 / 3. Em um trabalho posterior, (Katsuda, et al., 2008) estenderam as frequências em estudo e descobriram que o conteúdo

final de astaxantina em *H. pluvialis* cultivado mixotróficamente depende da intensidade da luz e do ciclo de trabalho para frequências de luz intermitente variando de 25 a 250 Hz. A 1 Hz, eles observaram maior conteúdo de astaxantina sob luz piscante em comparação com o atingido sob luz contínua. (Kim, et al., 2006), também relataram melhorias na acumulação de astaxantina por luz piscando usando *Haematococcus pluvialis*. Eles compararam uma fonte de luz intermitente de espectro completo com uma lâmpada fluorescente em carotenogênese, obtendo ganhos entre 60% e 400% na acumulação de astaxantina para frequências cerca de 3 Hz com um ciclo de trabalho de 4%. A PFD média da fonte piscante para o maior aprimoramento foi de  $16 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com a intensidade máxima de  $1724 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  devido à forma quase triangular do flash.

(XueE, et al., 2011), usaram um PBR de placa plana fina (10 mm de caminho de luz) para estudar o efeito de luz piscante no crescimento de *Arthrospira platensis*, usando LEDs brancos para gerar flashes de 0,01 a 20 Hz. Eles realizaram os experimentos com culturas diluídas para evitar o auto-sombreamento entre as células microalgais e relataram que maiores taxas de crescimento foram atingidas com frequências mais altas. A integração de luz total não foi alcançada por (XueE, et al., 2011), mas o grau de integração da luz aumentou com a frequência do flash e foi maior para altas intensidades de luz. Em relação ao PE, eles descobriram que era maior para intensidades mais baixas e ciclos de trabalho mais baixos.

(Vejrazka, et al., 2011), investigaram o PE de *Chlamydomonas reinhardtii* em luz piscante com frequências variando de 5 a 100 Hz com um ciclo de trabalho de 10% usando um painel LED de LEDs vermelhos e azuis (pico a 450 e 630 nm, respectivamente) e relatou que em 100 Hz, o PE corresponde ao de luz contínua com a mesma intensidade média. Em um estudo seguinte, (Vejrazka, et al., 2012) observaram que, para um ciclo de trabalho de 50% na faixa de frequências entre 1 e 10 Hz, o rendimento médio da biomassa diminuiu 10% em comparação com o obtido sob iluminação contínua. O mesmo ciclo de trabalho a 100 Hz atingiu um aumento de 35% sobre o rendimento de biomassa. Quando os ciclos de trabalho de 5%, 10%, 20% e 50% foram investigados, (Vejrazka & Janssen M, 2013) concluíram que o ciclo de trabalho de 10% alcançou o maior rendimento líquido de oxigênio quando a intensidade média foi de  $115 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e concluiu que a maior Ciclo de trabalho a absorção do fóton excedeu a taxa máxima de utilização de fótons, resultando em menores rendimentos de oxigênio.

(Fu, et al., 2012), aplicaram um método usado para adaptar estirpes microbianas ao estresse ambiental para melhorar o crescimento de *Chlorella vulgaris* em LEDs vermelhos de 660 nm, chamado evolução de laboratório adaptativo, que consiste em aproveitar a seleção natural para obter uma cepa que pode crescer mais rápido nas condições selecionadas. Usando esse método, eles poderiam obter uma cepa que apresentasse uma taxa de crescimento 1,43 vezes superior à taxa inicial. (Fu, et al., 2012), realizaram experimentos com luz piscante em diferentes ciclos de trabalho (10-30%) na mesma frequência (10 kHz). Para uma intensidade da luz de flash de  $850 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (o que significa que os ciclos de trabalho mais elevados apresentaram maiores intensidades de luz médias), eles observaram que a taxa de crescimento aumentou linearmente com o aumento do ciclo de trabalho, mas o PE diminuiu. Fixando a intensidade da luz média para  $170 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  obtiveram maior taxa de crescimento e PE no ciclo de serviço de 20%.

(Sforza, et al., 2012), estudaram efeito piscante em PE de cultivo de *Nannochloropsis salina* de baixa densidade. Eles usaram frequências intermitentes de 1 a 30 Hz com ciclos de operação de 10% e 33% e intensidade média de  $120 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ . Em relação à luz intermitente, eles relataram que a integração de luz total foi alcançada em 10 Hz para um ciclo de trabalho de 10%, enquanto que o crescimento de 5 e 1 Hz foi inibido. Para um ciclo de trabalho de 33%, a 10 Hz, o rendimento de crescimento foi menor que a intensidade média equivalente de luz contínua, mas equivalente ao observado quando a frequência foi de 30 Hz. Uma observação interessante foi que, quando as células são cultivadas sob luz pulsada, não foi observada indução de acumulação de lipídios.

Usando um PBR plano fino (Lunka & Bayless, 2013) investigaram o efeito de luz LED branca piscando em *Scenedesmus dimorphus*. Para um ciclo de trabalho de 20% e uma frequência intermitente de 1 kHz, atingiram quase 3 vezes a produtividade da biomassa em comparação com a luz contínua com a mesma intensidade média de  $75 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  com menos 10% de consumo de energia. Intensidades médias mais baixas apresentaram menor produtividade de biomassa, mas também consumo de energia específica menor, ou seja, maior PE.

(Kim, et al., 2014), estudaram o efeito da luz piscante no cultivo de *Chlamydomonas reinhardtii*. Eles estudaram o efeito da concentração do inóculo sob a luz piscante de LEDs brancos de diferentes frequências, ciclos de trabalho e intensidades sobre o conteúdo e o perfil do crescimento de *Chlamydomonas reinhardtii* e dos ácidos graxos (FA). Suas

experiências mostraram que o benefício da luz intermitente foi maior para maior concentração de biomassa. Com alta intensidade de luz (intensidade do flash de  $200 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) com um ciclo de trabalho de 50% e um período de 2 s, o crescimento de *Chlamydomonas reinhardtii* foi comparável ao obtido com iluminação contínua, sendo o consumo de energia 50% menor. A luz intermitente não alterou o conteúdo ou perfil da FA. Foi realizada a otimização adicional, usando luz intermitente de vários estágios, o que levou a redução do consumo de energia de 63%.

(Combe, et al., 2015), investigou a resposta de crescimento de *Dunaliella salina* a luz piscante com frequências variando de 0,017 a 5 Hz e ciclos de trabalho de 40 a 66%. Eles observaram maiores taxas de crescimento e maior teor de lipídios para frequências mais altas de luz piscando, mas os valores máximos foram alcançados com iluminação contínua. O diâmetro da célula, o perfil de pigmentação e o conteúdo de células de carbono e nitrogênio não foram afetados por luz piscando.

## **2.2. Atenuação da luz em fotobioreator (PBR)**

A luz só pode ser fornecida à superfície do fotobioreator (PBR), resultando em gradientes de luz dentro da PBR devido à absorção por células de microalgas. Quão profundo a luz irá penetrar através da cultura depende da densidade celular e suas características (em particular, o perfil de pigmentação) e no espectro de luz fornecido. Portanto, PPFD será heterogêneo ao longo da profundidade PBR devido a esse fenômeno conhecido como atenuação da luz.

As células microalgais movem-se aleatoriamente através do PBR e são expostas a diferentes intensidades de luz, dependendo da sua posição devido à atenuação da luz. Maiores densidades de cultura intensificam o fenômeno de atenuação da luz, levando a uma queda rápida da intensidade da luz na profundidade do PBR. Se a densidade for alta o suficiente, haverá zonas escuras no PBR, e as células microalgais, que se deslocam constantemente entre zonas escuras e iluminadas, serão expostas a um regime de luz que imita luz intermitente. Os recursos intermitentes serão relacionados ao tempo necessário, em média, para uma célula microalgal para atravessar toda a largura do reator (o caminho óptico - OP). O efeito de luz intermitente sobre a eficiência fotossintética vem da sincronização entre os intervalos de tempo fotossintéticos e as escalas de tempo relacionadas ao movimento das células dentro da PBR. Para culturas densas e PBRs

esessos, o tempo gasto em média por uma célula microalgal na zona escura pode ser muito maior do que o tempo necessário para aparelhos fotossintéticos para converter os fótons absorvidos em energia química. Neste caso, o tempo entre o momento em que o aparelho fotossintético completou um ciclo e o momento em que a célula atinge a zona fótica no PBR será desperdiçado. O tempo gasto por uma célula na zona escura pode ser encurtado aumentando a taxa de mistura, o que aumentará a difusão celular através do PBR, reduzindo o OP, reduzindo a densidade da cultura ou aumentando a irradiância.

### **2.3. Oportunidades de pesquisa com a *Chlorella zofingiensis***

Os estudos e correspondentes resultados apresentados anteriormente levam a acreditar na importância do estudo das influências das condições de iluminação no cultivo da *Chlorella zofingiensis*, como método capaz de aumentar a eficiência energética e, por conseguinte, aumentar a produtividade em biomassa e/ou em outros produtos de valor, o que motivou a realização do estudo que será apresentado nos capítulos seguintes.

# 3. Materiais e métodos

## 3.1. Estirpe e condições de cultivo de microalgas

As células de *Chlorella zofingiensis* SAG-211.14 foram adquiridas à *Experimental Phycology and Culture Collection of Algae at the University of Goettingen* (Alemanha) e cultivadas em meio de cultura *Bold's Basal Medium modificado*, conforme descrito na Tabela 18 do Anexo A, esterilizado, com o triplo da quantidade de NaNO<sub>3</sub>, contendo 250,0 mg L<sup>-1</sup> de NaNO<sub>3</sub>, 25,00 mg L<sup>-1</sup> de CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 75,00 mg L<sup>-1</sup> de MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 4,98 mg L<sup>-1</sup> de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 75,0 mg L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 175,0 mg L<sup>-1</sup> de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 25,0 mg L<sup>-1</sup> de NaCl, 50,0 mg L<sup>-1</sup> de C<sub>10</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (EDTA), 1,57 mg L<sup>-1</sup> de CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 0,71 mg L<sup>-1</sup> de MoO<sub>3</sub>, 11,13 mg L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 8,83 mg L<sup>-1</sup> de ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0,49 mg L<sup>-1</sup> de Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 6,06 mg L<sup>-1</sup> de MoO<sub>3</sub>, 31,00 mg L<sup>-1</sup> de KOH, 0,98 mg L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Merck & Co.) and 1,44 mg L<sup>-1</sup> de MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O (BDH Prolabo). Todos os reagentes utilizados foram de pureza analítica. As microalgas foram cultivadas em frascos de vidro de 5 L, sob iluminação contínua com lâmpadas de tubo fluorescente a 35 μE m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, constantemente arejadas com ar atmosférico hidratado, filtrado através de uma membrana de politetrafluoroetileno de 0,20 μm, à temperatura de 24 ± 2 °C.

## 3.2. Configuração experimental e cultivo de microalgas

Para a realização dos ensaios, as células de *C. zofingiensis* foram cultivadas

fotoautotroficamente em modo *batch* em tubos cilíndricos de vidro de borossilicato de 15 mm de diâmetro interno, com o volume inicial de 15 mL. Para fornecimento de carbono inorgânico e agitação, a suspensão foi constantemente arejada com ar atmosférico hidratado, filtrado através de uma membrana de politetrafluoroetileno de 0,20  $\mu\text{m}$ . Todos os ensaios foram realizados em triplicado. Os fotobiorreactores (PBRs) foram colocados dentro de um tanque de recirculação de água como demonstra a Figura 3, que manteve a temperatura constante a  $24,0 \pm 0,1$  °C. A concentração inicial de biomassa foi ajustada para  $0,13 \pm 0,01$   $\text{g}_{\text{dw}} \text{L}^{-1}$  (peso seco). O pH inicial foi ajustado para 7 com solução de HCL.

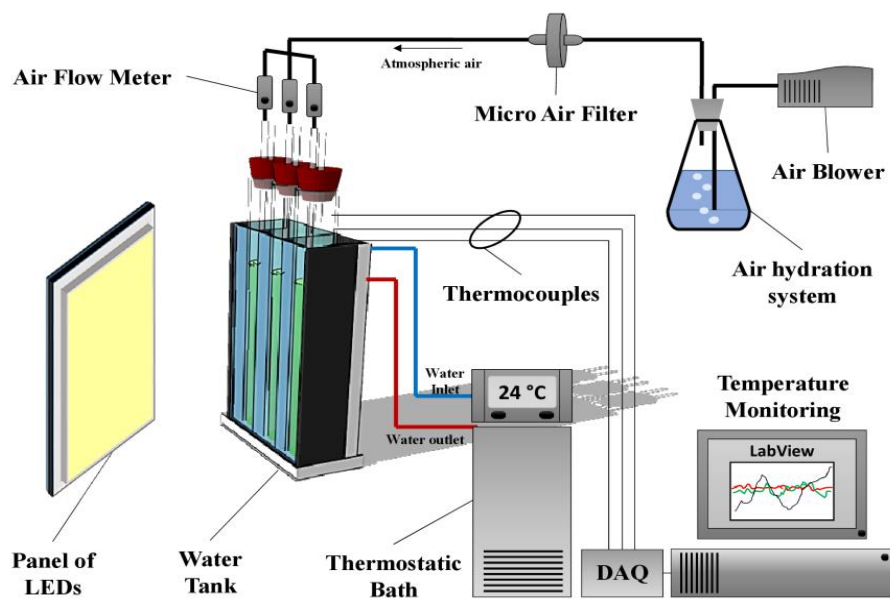
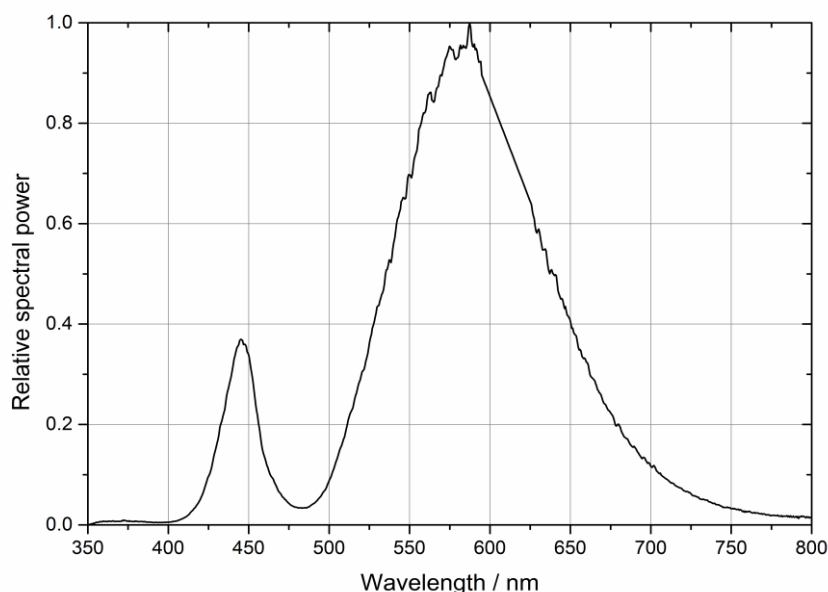


Figura 3 - Esquema do experimento (Silva, et al., 2018)

### 3.3. Condições de iluminação

O PPFD foi medido dentro do PBR dentro do tanque cheio de água usando um sensor quântico LI 190 conectado a um medidor de luz LI 250A (LI-COR Inc., EUA). A interferência da luz ambiente não foi superior a  $0,5 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A iluminação foi fornecida por painéis de díodos emissores de luz (LEDs) branca. A composição da luz espectral como mostra a Figura 4, foi medida entre 200 e 800 nm usando um espectroradiômetro que consistiu em um mini espectrofotômetro (Getspec 2048, Avantes, Holanda) conectado a uma fibra óptica (FC-UV200, Avantes, Holanda). O PPFD foi ajustado variando a distância entre painéis de LEDs e PBRs. A iluminação em experiências de fotoperíodo foi fornecida de modo a que todos os PBRs fossem expostos ao mesmo PPFD ( $\text{PPFD}_{\text{av}}$ ) em

média, ou seja, no final de cada fotoperíodo, PBRs de ensaios diferentes receberam a mesma quantidade de energia luminosa.



**Figura 4 - Composição luminosa espectral de painéis LED brancos utilizados durante a cultura de *C. zofingiensis* (Silva, et al., 2018)**

### **3.4. Monitorização do crescimento**

O crescimento de microalga foi seguido por medição espectrofotométrica de densidade óptica a 680 nm utilizando UV VIS Pharmaspec UV 1700 (Shimadzu Corp, Kyoto, Japão) e correlacionada com a concentração de peso seco de biomassa liofilizada (DW). A correlação entre a concentração de biomassa DW e a densidade óptica a 680 nm foi realizada utilizando biomassa com diferentes perfis de pigmentação, dentro da variação observada no presente estudo. O número de células foi determinado usando um hemocitômetro de câmara Neubauer (Hirschmann Laborgeräte GmbH & Co. KG, Alemanha) e um microscópio trinocular 400 equipado com lentes de aumento 5x, 10x, 40x e 100x e uma câmera digital DCM 200 (Hangzhou Scopetek Opto Electric Co., Ltd., China).

### **3.5. Parâmetros de crescimento cinético**

A concentração da biomassa foi utilizada para determinar a taxa de crescimento específico ( $\mu$ ,  $d^{-1}$ ). A taxa de crescimento específica foi determinada de acordo com a Equação 1:

$$\mu = \frac{\ln(X_f) - \ln(X_0)}{t_f - t_0} \quad (1)$$

onde  $X_0$  e  $X_f$  são as concentrações de biomassa DW no início ( $t_0$ ) e no final ( $t_f$ ) da experiência, respectivamente.

As produtividades de biomassa ( $P$ ) foram calculadas a partir da mudança na concentração de biomassa dentro de um tempo de cultivo, como mostrado na Equação 2.

$$P = \frac{X_f - X_0}{t_f - t_0} \quad (2)$$

### 3.6. Evolução do consumo diário de nitrato (ECN)

Para cada ensaio, as alíquotas de cultura foram centrifugadas durante 15 min a 1200 rpm (centrífuga Eppendorf 5810, Alemanha).

O sobrenadante foi utilizado para a determinação da concentração de nitratos, que foi utilizado como indicador da disponibilidade de nutrientes. O final do ensaio foi considerado o último dia do ensaio ou o dia em que a depleção de nitrato foi verificada (o que ocorreu primeiro). Os indicadores de qualidade de crescimento e biomassa foram calculados em ou até aquele dia. A evolução do consumo de nitrato ECN ( $\text{mgL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) foi determinado de acordo com a Equação 3:

$$ECN = \frac{[\text{NO}_3^-]_0 - [\text{NO}_3^-]_f}{t_f - t_0} \quad (3)$$

onde  $[\text{NO}_3^-]_0$  e  $[\text{NO}_3^-]_f$  e são as concentrações de nitrato no início e no final da experiência, respectivamente.

### 3.7. Perfil de pigmentação

Alíquotas de cultura foram centrifugadas durante 15 min a 2500 rpm (centrífuga Eppendorf 5810, Alemanha). O sedimento de microalgas foi ressuspensão em 1,50 ml de dimetil sulfóxido (grau analítico, Fisher Scientific, U.K.), seguido de agitação de vortex de 30 s e 30 min de aquecimento em banho-maria a  $55 \pm 1$  °C (Orosa, et al., 2005). A mistura foi novamente centrifugada e as concentrações de clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de

absorvência a 480, 649 e 665 nm em UV VIS Pharmaspec UV 1700 (Shimadzu Corp., Kyoto, Japão), então correlacionou-se com a concentração de massa usando equações de Wellburn:

$$C_{Ca} = 12.19 \cdot A_{665} - 3.45 \cdot A_{649} \quad (4)$$

$$C_{Cb} = 21.99 \cdot A_{649} - 5.32 \cdot A_{665} \quad (5)$$

$$C_{Car} = \frac{1000 \cdot A_{480} - 2.14 \cdot C_{Ca} - 70.16 \cdot C_{Cb}}{220} \quad (6)$$

onde  $A_{665}$ ,  $A_{649}$  e  $A_{480}$  são as absorvâncias medidas a 665, 649 e 480 nm, respectivamente (onde o comprimento do percurso é de 10 mm), descrita nas Equações 4, 5 e 6.

### **3.8. Condições de ensaio**

O primeiro grupo de ensaios foi realizado para avaliar a taxa de crescimento da *C. zofingiensis* sob diferentes irradiâncias e iluminação contínua, conforme a Tabela 2, sendo subdividida em dois ensaios denominados A e B, respectivamente aos cronogramas dos dias 18-03 e 28-04.

**No segundo grupo de ensaios, foram aplicados fotoperíodos com diferentes períodos e ciclos de iluminação, mantendo a irradiância média entre os ensaios conforme a**

Tabela 3, sendo subdividida em três ensaios denominados C, D e E respectivamente aos cronogramas dos dias 09-05, 06-06 e 26-06.

**Tabela 2 - Condições de iluminação relativas ao primeiro grupo de ensaio A e B.**

<b>Ensaio</b>	<b>PPFD (<math>\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}</math>)</b>
C0	0
C5	5
C18	17,5
C30	30
C45	45
C60	60
C75	75
C113	112,5
C150	150

**Tabela 3 - Condições de iluminação relativas ao segundo grupo de ensaios C, D e E.**

Ensaio	PPFD <sub>a/v</sub> *	Duração período iluminado	PPFD <sub>H</sub> *	Duração período sem iluminação	Ciclo de iluminação
P500C25	45	0,125 ms	180	0,375 ms	25 %
P500C50	45	0,250 ms	90	0,250 ms	50 %
P500C75	45	0,375 ms	60	0,125 ms	75 %
P30C25	45	7,5 min	180	22,5 min	25 %
P30C50	45	15 min	90	15 min	50 %
P30C75	45	22,5 min	60	7,5 min	75 %
P60C25	45	15 min	180	45 min	25 %
P60C50	45	30 min	90	30 min	50 %
P60C75	45	45 min	60	15 min	75 %

\*PPFD<sub>a/v</sub> e PPFD<sub>H</sub> em ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

### 3.9. Primeiro grupo de ensaios

O primeiro grupo de ensaios foi realizado para avaliar a taxa de crescimento da *C. zofingiensis* cultivada sob diferentes intensidades luminosas e ciclo de iluminação constante, conforme a Tabela 2, sendo subdividido em dois ensaios denominado A e B, respectivamente aos cronogramas dos dias 18-03 e 28-04.

#### 3.9.1. Condições do ensaio

As condições gerais previstas na Tabela 4 definem o meio de cultura que se encontra a microalga, o caudal de arejamento, o volume e a concentração nos PBRS, dos ensaios A e B do primeiro grupo de ensaio.

**Tabela 4 - Condições gerais do primeiro grupo de ensaios A e B.**

Condições Gerais	
Meio de cultura	BBM 3N
Arejamento	20 mL/min
PBRs	Tubos 17 mL
Conc Inicial	0,125
Iluminação	$45 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A/V	$\text{m}^2 \text{L}^{-1}$

#### 3.9.2. Condições de intensidade luminosa do ensaio

Este estudo avalia o efeito de diferentes intensidades luminosas ( $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), para o mesmo fotoperíodo ( $24 \text{ h d}^{-1}$  de iluminação no tempo fotossintético da densidade de fluxo de fótons) ( $\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e luz modulada, ciclo de 24 h no crescimento de *C. zofingiensis*. A Tabela 6 demonstram as condições gerais de intensidade luminosa para o ciclo de iluminação de 100% para o primeiro grupo de ensaios A e B, respectivamente.

**Tabela 5 - Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaios A**

Ensaio	PBRs correspondentes	PPFDa/v ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Ciclo de iluminação
C150	#1, #2, #3	150,0	100%
C75	#4, #5, #6	75,0	100%
C30A	#7, #8, #9	30,0	100%
C5	#10, #11, #12	5,0	100%
C0	#13, #14, #15	0,0	100%

**Tabela 6 - Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupo de ensaio B**

Ensaio	PBRs correspondentes	PPFDa/v ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Ciclo de iluminação
C113	#1, #2, #3	112,5	100%
C60	#4, #5, #6	60,0	100%
C45B	#7, #8, #9	45,0	100%
C18	#10, #11, #12	17,50	100%
C30B	#13, #14, #15	30,0	100%

### 3.9.3. Densidade óptica pretendida do ensaio

O primeiro grupo de ensaios A e B, cujas condições de densidade óptica pretendida estão descritas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Densidade óptica pretendida do primeiro grupo de ensaio A e B.**

Inoculação			
DO pretendida	0,310		
DW ( g/L)	0,13	0,01	0,01
Vol pretendido (mL)	300		0
Diluição	4,0	40,0	16,0
DO conc. Leitura	0,627		
V_conc_nec (mL)	37,08		

### 3.9.4. Cronograma

O primeiro grupo de ensaios A e B, descritos nos cronogramas demonstrados nas Tabela 8 e Tabela 9 respectivamente.

**Tabela 8 - Cronograma do ensaio A.**

indice	folha	data	hora	tempo / d	dias	Tempo / d
1	d0	28/mar (ter)	09:30:00	0,00	d0	0,00
2	d1	29/mar (quar)	09:30:00	1,00	d1	1,00
3	d2	30/mar (quin)	09:30:00	2,00	d2	2,00
4	d3	31/mar (sex)	09:30:00	3,00	d3	3,00
5	d4	01/abr (sáb)	09:30:00	4,00	d4	4,00
6	d5	02/abr (dom)	#REF!	4,00	d6	6,00
7	d6	03/abr (seg)	09:30:00	6,00	d7	7,00
8	d7	04/abr (ter)	09:30:00	7,00	d8	8,00
9	d8	05/abr (qua)	09:30:00	8,00	d9	9,00
10	d9	06/abr (qui)	09:30:00	9,00	d10	10,00
11	d10	07/abr (sex)	09:30:00	9,00	d10	11,00

**Tabela 9 - Cronograma do ensaio B.**

índice	folha	data	hora	tempo / d	dias	Tempo / d
1	d0	18/abr (ter)	09:30:00	0,00	d0	0,00
2	d1	19/abr (qua)	09:30:00	1,00	d1	1,00
3	d2	20/abr (qui)	09:30:00	2,00	d2	2,00
4	d3	21/abr (sex)	09:30:00	3,00	d3	3,00
5	d4	22/abr (sáb)	09:30:00	4,00	d4	4,00
6	d5	23/abr (dom)	#REF!	4,00	d6	6,00
7	d6	24/abr (seg)	09:30:00	6,00	d7	7,00
8	d7	25/abr (ter)	09:30:00	7,00	d8	8,00
9	d8	26/abr (qua)	09:30:00	8,00	d9	9,00
10	d9	27/abr (qui)	09:30:00	9,00	d10	10,00
11	d10	28/abr(sex)	09:30:00	9,00	d10	11,00

### 3.10. Segundo grupo de ensaios

Ao segundo grupo de ensaios foram aplicados diferentes fotoperíodos e ciclos de iluminação, mantendo a intensidade luminosa, para avaliar a taxa de crescimento da *C. zofingiensis*. Este grupo de ensaios foi subdividido em tres ensaios denominados C, D e E respectivamente aos cronogramas dos dias 09-05, 06-06 e 26-06.

#### 3.10.1. Condições do ensaio

As condições gerais previstas na Tabela 10, definem o meio de cultura em que se encontra a microalga, o caudal de arejamento, o volume e a concentração nos PBRs, dos ensaios C, D e E do segundo grupo de ensaio.

**Tabela 10 - Condições gerais do primeiro grupo de ensaio C, D e E.**

Condições Gerais	
Meio cultura	BBM 3N
Arejamento	20 mL/min
PBRs	Tubos 17 mL
Conc Inicial	0,125
Iluminação	45 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
A/V	$\text{m}^2 \text{L}^{-1}$

#### 3.10.2. Condições de intensidade luminosa do ensaio.

Este estudo avalia o efeito da irradiância da luz ( $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), para diferentes fotoperíodos (24 h  $\text{d}^{-1}$  de iluminação no tempo fotossintético da densidade de fluxo de fótons) e diferente luz modulada clara e escura para o ciclo de 24 h no crescimento de *C. zofingiensis*. A Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 demonstram as condições gerais de intensidade luminosa para o ciclo de iluminação variado para o segundo grupo de ensaio C,

D e E respectivamente. No ensaio C foram descartados os demais reatores, permanecendo somente os reatores #10, #11 e #12.

**Tabela 11 - Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupode ensaio C**

Ensaio	PBRs correspond.	High light period			Low light period		Ciclo de iluminação
		PPFDav / -1	Duração	PPFDH / -1	Duração	PPFDL / -1	
P500C75	#10, #11, #12	45,0	0,375 ms	60	0,125 ms	0	75%

**Tabela 12 - Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupode ensaio D**

Ensaio	PBRs correspondentes	High light period			Low light period		Ciclo de iluminação
		PPFDav / 1	Duração	PPFDH / 1	Duração	PPFDL /	
P60C25	#1, #2, #3	45,0	15 min	180	45 min	0	25%
P30C25	#4, #5, #6	45,0	7,5 min	180	22,5 min	0	25%
P30C50	#7, #8, #9	45,0	15 min	90	15 min	0	50%
P30C75	#10, #11, #12	45,0	22,5 min	60	7,5 min	0	75%
P500C50	#13, #14, #15	45,0	0,250 ms	90*	0,250 ms	0	50%

**Tabela 13 - Condições gerais de intensidade luminosa do primeiro grupode ensaio E**

Ensaio	PBRs correspondentes	High light period			Low light period		Ciclo de iluminação
		PPFDav /	Duração	PPFDH /	Duração	PPFDL / -1	
P60C75	#1, #2, #3	45,0	45 min	60	15 min	0	75%
P60C50	#4, #5, #6	45,0	30 min	90	30 min	0	50%
P30C50	#7, #8, #9	45,0	15 min	90	15 min	0	50%
C45 E	#10, #11, #12	45,0					100%
P500C25	#13, #14, #15	45,0	0,125 ms	180*	0,375 ms	0	25%

PPFD<sub>av</sub> / PPFD<sub>A/V</sub>, PPFD<sub>H</sub> e PPFD<sub>L</sub> ( $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 3.10.3. Densidade óptica pretendida do ensaio

O segundo grupo de ensaios C, D e D cujas condições de densidade óptica pretendida estão descritas na Tabela 14.

**Tabela 14 - Densidade óptica pretendida do primeiro grupo de ensaio C, D e E.**

Inoculação			
DO pretendida	0,310		
DW g/L	0,13	-0,01	-0,01
Vol pretendido mL	300		0
Diluição	4,0	40,0	16,0
DO conc. Leitura	0,627		
V_conc_nec mL	37,08		

### 3.10.4. Cronograma

O primeiro grupo de ensaios C, D e E, encontra-se descrito nos cronogramas demonstrados na Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

**Tabela 15 - Cronograma do ensaio C**

indice	folha	data	hora	tempo / d	dias	Tempo / d
1	d0	09/maio (ter)	09:30:00	0,00	d0	0,00
2	d1	10/maio(qua)	09:30:00	1,00	d1	1,00
3	d2	11/maio (qui)	09:30:00	2,00	d2	2,00
4	d3	12/maio (sex)	09:30:00	3,00	d3	3,00
5	d4	13/maio(sáb)	09:30:00	4,00	d4	4,00
6	d5	14/maio(dom)	#REF!	4,00	d5	6,00
7	d6	15/maio (seg)	09:30:00	6,00	d6	7,00
8	d7	16/maio (ter)	09:30:00	7,00	d7	8,00
9	d8	17/maio (qua)	09:30:00	8,00	d8	9,00
10	d9	18/maio (qui)	09:30:00	9,00	d9	10,00
11	d10	19-maio	09:30:00	10,00	d10	11,00

**Tabela 16 - Cronograma do ensaio D**

indice	folha	data	hora	tempo / d	dias	Tempo / d
1	d0	06/junho (ter)	09:30:00	0,00	d0	0,00
2	d1	07/junho(qua)	09:30:00	1,00	d1	1,00
3	d2	08/junho (qui)	09:30:00	2,00	d2	2,00
4	d3	09/junho(sex)	09:30:00	3,00	d3	3,00
5	d4	10/junho(sáb)	09:30:00	4,00	d4	4,00
6	d5	11/junho(dom)	#REF!	4,00	d5	6,00
7	d6	12/junho (seg)	09:30:00	6,00	d6	7,00
8	d7	13/junho (ter)	09:30:00	7,00	d7	8,00
9	d8	14/junho (qua)	09:30:00	8,00	d8	9,00
10	d9	15/junho (qui)	09:30:00	9,00	d9	10,00
11	d10	16/junho(sex)	09:30:00	10,00	d10	11,00

**Tabela 17 - Cronograma do ensaio E**

indice	folha	data	hora	tempo / d	dias	Tempo / d
1	d0	26/jun(ter)	09:30:00	0,00	d0	0,00
2	d1	27/jun(qua)	09:30:00	1,00	d1	1,00
3	d2	28/jun(quin)	09:30:00	2,00	d2	2,00
4	d3	29/jun(sex)	09:30:00	3,00	d3	3,00
5	d4	30/jul(sab)	09:30:00	4,00	d4	4,00
6	d5	01/jul(dom)	#REF!	4,00	d5	6,00
7	d6	02/jul(seg)	09:30:00	6,00	d6	7,00
8	d7	03/jul(ter)	09:30:00	7,00	d7	8,00
9	d8	04/jul(quar)	09:30:00	8,00	d8	9,00
10	d9	05/jul(quin)	09:30:00	9,00	d9	10,00



# 4. Resultados e discussões do primeiro ensaio

## 4.1. Parametros de crescimento cinetico do ensaio A.

### 4.1.1. Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio A

A concentração de biomassa foi utilizada para determinar a taxa de crescimento específico diária ( $\mu$ ,  $d^{-1}$ ). As taxas de crescimento específicas foram determinadas de acordo com a Equação 1.

A resposta a estímulos ou mudanças em seu ambiente é uma característica inerente de qualquer organismo vivo. As mudanças nas condições ambientais podem, portanto ser definido com base na resposta que a célula sofre como resultado da mudança detectada seja um fator de limitação ou de estresse, que ocorreu entre o início do ensaio até o segundo dia. No início do ensaio até o segundo dia houve a fase de Indução ou fase de Lag onde houve a adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular.

Pode se perceber a fase exponencial ou fase Log ocorrida entre o segundo e terceiro dia. Nesta: fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo, e conseqüentemente a fase de diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado, ocorrido. Esta fase deve-se a diminuição de nutrientes que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, conseqüentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento

entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial. Na fase estacionária, não há variação da densidade celular, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular. As taxas de crescimento foram proporcionais à intensidade de luz, o que quer dizer que intensidade de luz maior favorece o aparecimento algal, até que atinja o ponto de saturação e baixas intensidades luminosas provocam a fotoinibição.

As maiores taxas de crescimento no ensaio A, com ciclo de iluminação de 100% atingiram os valores com intensidades luminosas de 150, 75, 30, 5 e 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), atingindo os valores no C150 de  $(0,894 \pm 0,340)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia, no C75 de  $(0,565 \pm 0,062)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no quarto dia, no C30A de  $(0,388 \pm 0,064)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no sétimo dia, no C5 de  $(0,242 \pm 0,200)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no sétimo dia e no C0  $(0,209 \pm 0,183)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no nono dia. Nota-se que a intensidade luminosa favorece a taxa de crescimento.

A Figura 5 demonstra a média e o desvio padrão das taxas de crescimento específicas do peso seco (DW), nos reatores em triplicado sobre a mesma condição do primeiro grupo de ensaio A. A distribuição da intensidade luminosa demonstrada na Figura 5 foi verificada através da curva de crescimento dos cultivos das microalgas nos diferentes reatores do primeiro grupo de ensaio A. A cinética de crescimento para todos os reatores apresenta comportamento semelhante.

A Tabela 20 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio A.

A Tabela 21 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio A.

A Tabela 22 demonstra a taxa de crescimento ( $\text{d}^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 23 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $\text{d}^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

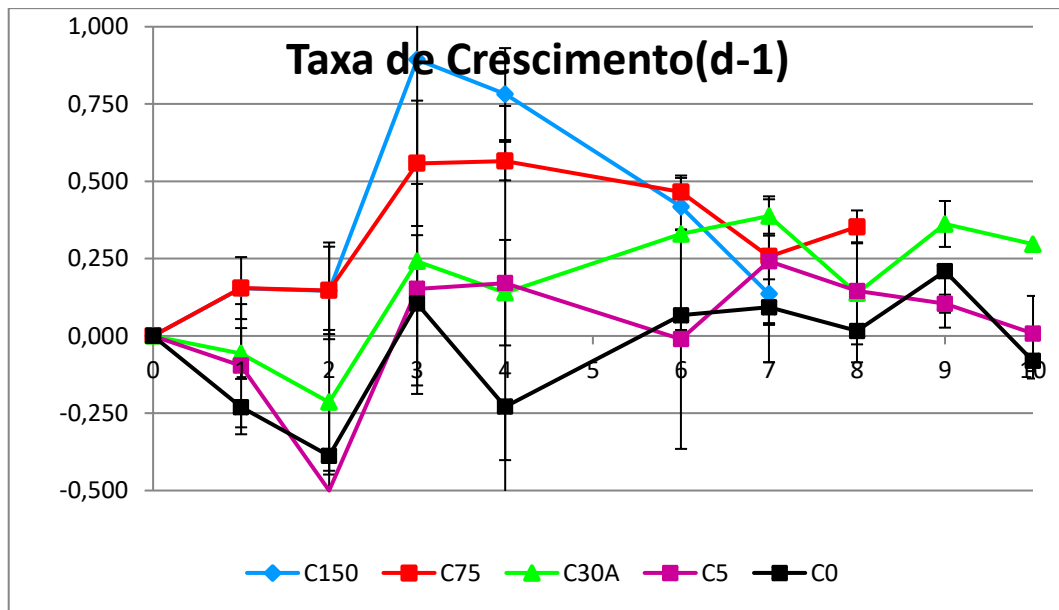


Figura 5 - Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaios A

#### 4.1.2. Produtividade do primeiro grupo de ensaio A

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro do mesmo tempo de cultivo, demonstrado na Equação 2.

As maiores taxas de produtividade ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) no ensaio A atingiram os valores com intensidades luminosas de 75, 150, 30, 5 e 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), atingindo os valores no C75 de ( $0,689 \pm 0,038$ ), no oitavo dia, no C150 de ( $0,563 \pm 0,109$ ) ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) no sexto dia, no C30 de ( $0,206 \pm 0,016$ ) ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ), no décimo dia, no C5 de ( $0,031 \pm 0,073$ ) ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) no quarto dia e no C0 ( $0,016 \pm 0,014$ ) ( $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) no nono dia, respectivamente.

Percebe-se que a intensidade luminosa no C150 pode ter atingido seu ponto de saturação, no que resultou melhor produtividade no C75.

A Figura 6 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 24 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 25 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

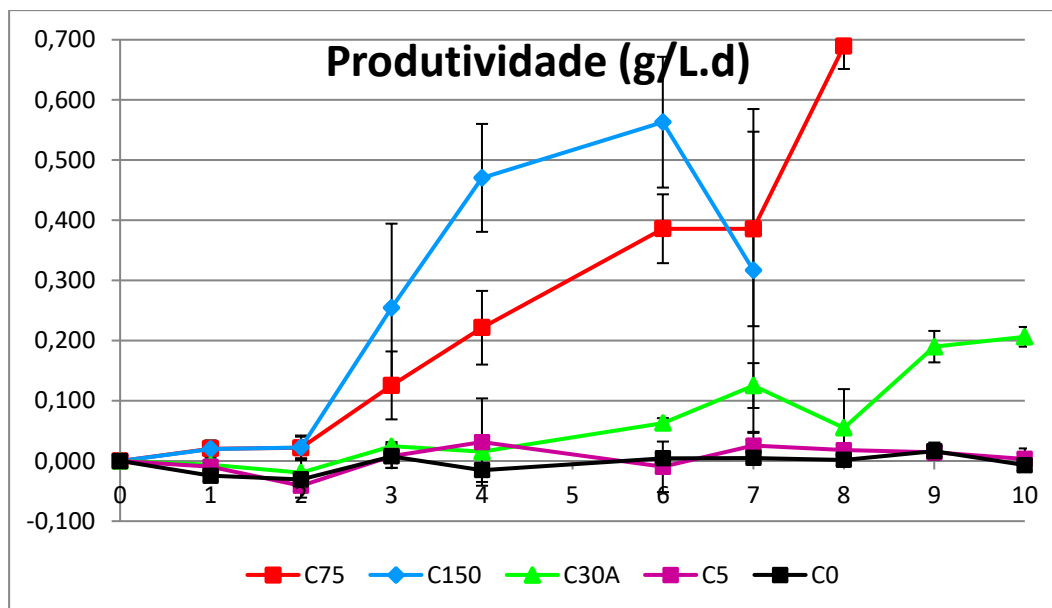


Figura 6 - Produtividade do primeiro grupo de ensaios A

#### 4.1.3. Evolução do consumo diário de nitrato no primeiro grupo de ensaios A

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3: Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo. Não existe aumento significativo do consumo de nutriente até o segundo dia, devido a esta fase ter pouco aumento da taxa de crescimento, podendo surgir o aparecimento de nitrato ao meio devido a redução na densidade celular.

O consumo de nitrato aumentou com o aumento da taxa de crescimento da cultura. Com o aumento da densidade microalgal houve necessidade de mais consumo de nutrientes, o que justifica que as maiores intensidades luminosas favoreceram as taxas de crescimento e, consequentemente aumentam a necessidade de nutrientes.

Na fase de diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado a diminuição da evolução de nitrato que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, consequentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial. Na fase estacionária, não há evolução do consumo de nitrato, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular.

As maiores evoluções do consumo de nitrato (mg/L d) no ensaio a atingiu os valores com intensidade luminosa de 150, 75 30, 0 e 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), atingindo os valores no C150 de  $(158,894 \pm 23,373)$  (mg/L d), no quarto dia, no C75 de  $(140,521 \pm 37,992)$  (mg/L d) no sétimo dia, no C30A de  $(58,182 \pm 30,673)$  (mg/L d), no décimo dia, no C0  $(41,679 \pm 33,476)$  (mg/L d) no oitavo dia, e o C5 de  $(40,319 \pm 18,883)$  (mg/L d) no oitavo dia,

A Figura 7 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário de nitato, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaios A.

A Tabela 26 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A. A Tabela 27 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A, após tratamento de dados. A Tabela 28 demonstra a evolução do consumo de nitrato (mg/L d.) de cada reator do primeiro grupo de ensaio A. A Tabela 29 demonstra a média e o desvio padrã da evolução do consumo de nitrato (mg/L d.) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

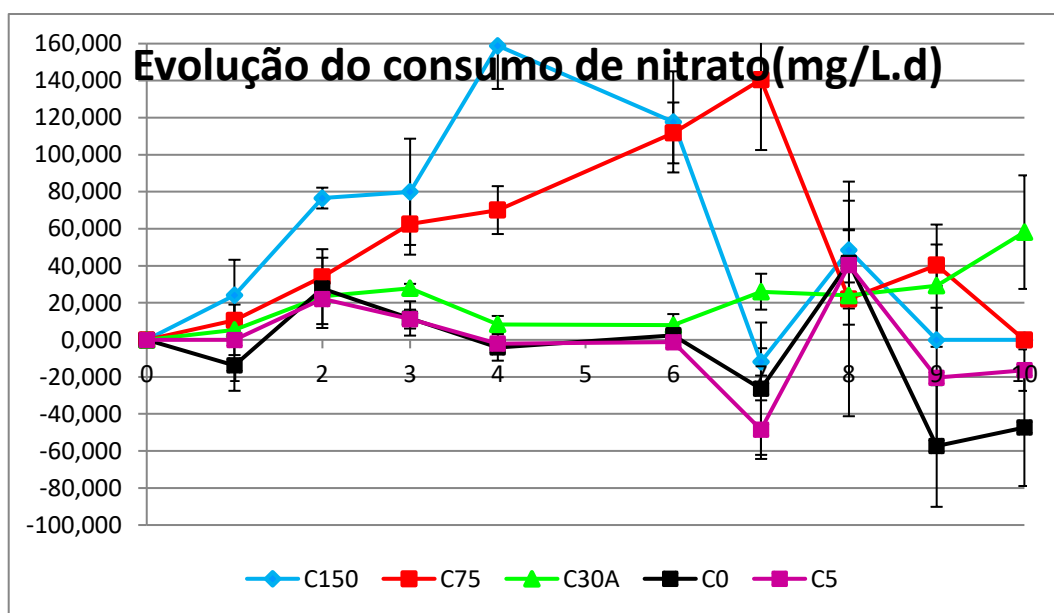


Figura 7 - Evolução do consumo diário de nitrato do primeiro grupo de ensaio A

#### 4.1.4. Pigmento do primeiro grupo de ensaio A

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(60,333 \pm 2,581)$  (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $46,667 \pm 6,332$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $40,767 \pm 7,922$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $34,600 \pm 5,761$ ), (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $22,067 \pm 5,564$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A Tabela 79 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio A.

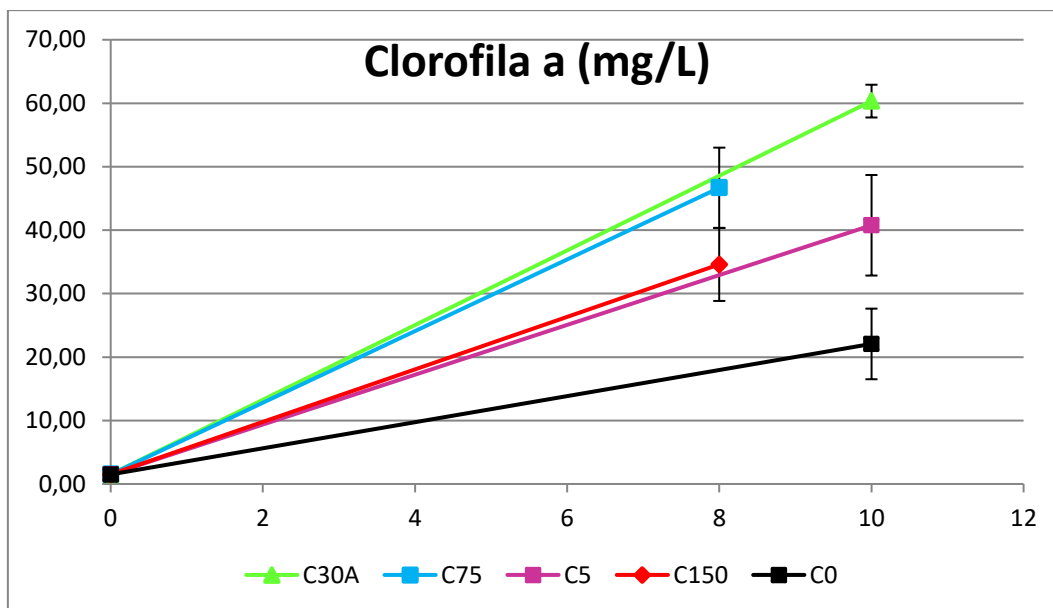
A Tabela 80 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio A.

Tabela 81 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio A.

Tabela 82 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio A.

Tabela 83 a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio A.

A Tabela 84 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio A.



**Figura 8 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-a do ensaio A**

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $24,767 \pm 0,666$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

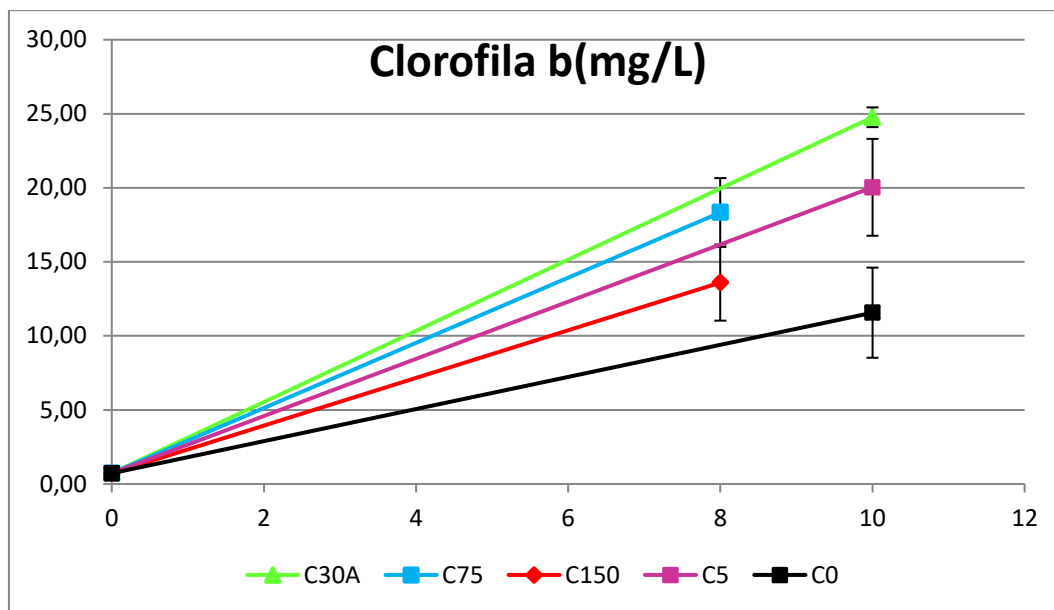
A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $20,767 \pm 3,272$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $18,333 \pm 2,325$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $13,600 \pm 2,571$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $11,567 \pm 3,044$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A Figura 9 demonstra o perfil do pigmento clorofila-*b* do primeiro grupo de ensaio A.



**Figura 9 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-b do ensaio A**

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $14,167 \pm 0,833$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $13,000 \pm 2,651$ ), (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $12,700 \pm 2,287$ ), (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $10,7677 \pm 2,294$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $5,867 \pm 1,387$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A Figura 10 demonstra A concentração do pigmento carotenóide do ensaio A.

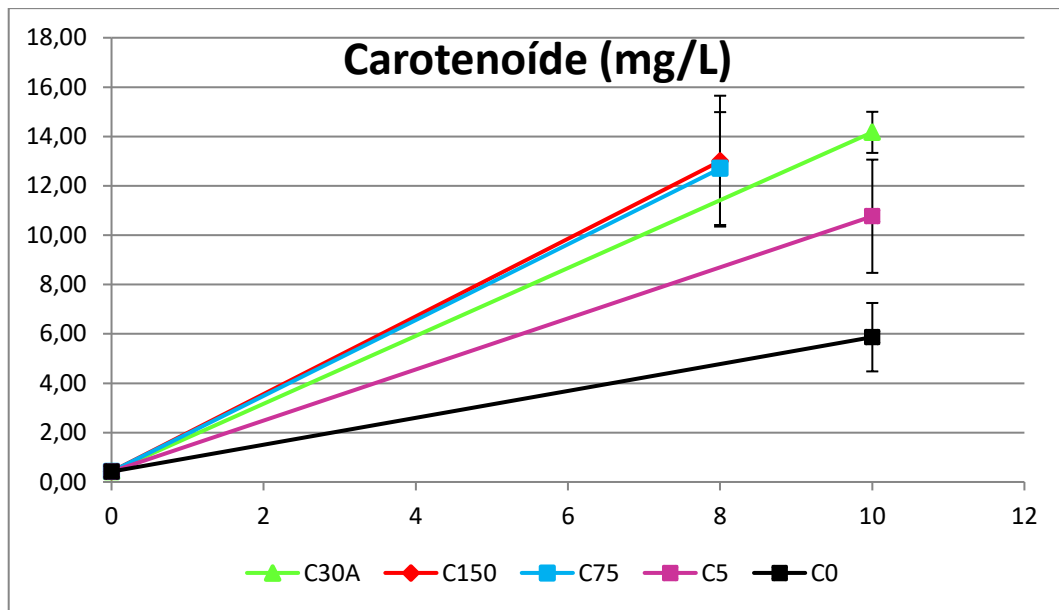


Figura 10 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenoíde do ensaio A

## 4.2. Parametros de crescimento cinetico do ensaio B

### 4.2.1. Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio B

As maiores taxas de crescimento no ensaio B atingiram os valores com intensidade luminosa de 112,5, 60, 45, 30 e 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% ,atingiram os valores no C113 de  $(0,796 \pm 0,200)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia, no C60 de  $(0,663 \pm 0,318)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no terceiro dia, no C30  $(0,631 \pm 0,450)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no segundo dia, no C45B de  $(0,621 \pm 0,333)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no oitavo dia e no C18 de  $(0,618 \pm 0,188)$  ( $\text{d}^{-1}$ ) no segundo dia o que demonstra que quanto maior a intensidade luminosa melhores as taxas de crescimento.

Pode se perceber a fase exponencial ou fase Log ocorrida favorece as melhores taxas de crescimento, nesta fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo, que atingiu os melhores resultados com intensidade de luz maior.

A Figura 11 demonstra a média e o desvio padrão das taxas de crescimento específicas do peso seco (DW), nos reatores em triplicado sobre a mesma condição do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 30 demonstra a concentração em peso seco (g/L) ao longo do ensaio B.

A Tabela 31 demonstra a concentração em peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio B.

A Tabela 32 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) em cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 33 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

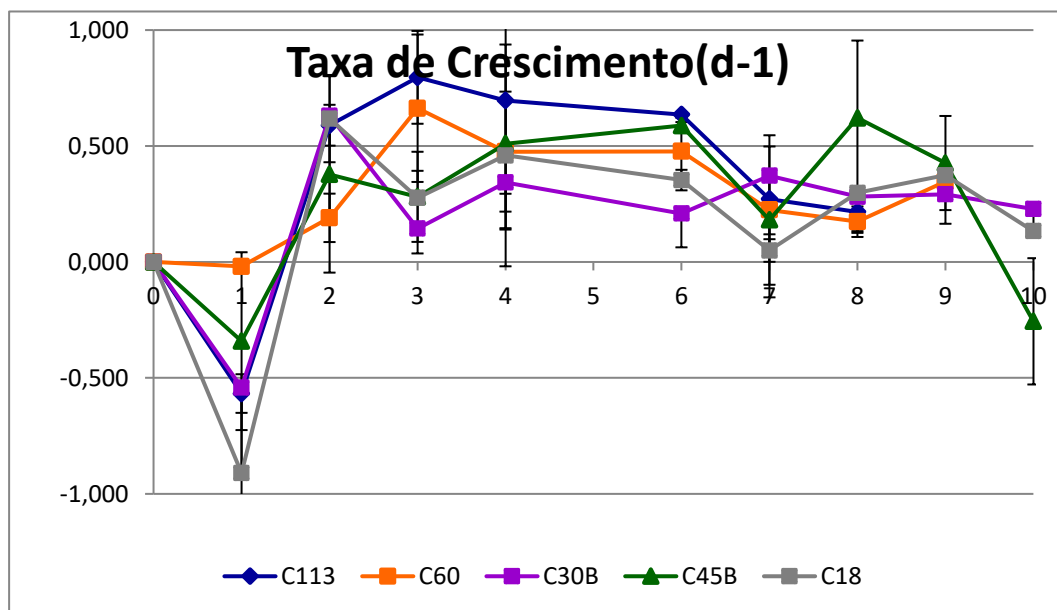


Figura 11 - Taxa de crescimento para o primeiro grupo de ensaio B

#### 4.2.2. Produtividade do primeiro grupo de ensaio B

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro de um mesmo tempo de cultivo, como mostrado na Equação 2.

As maiores taxas de produtividade ( $gL^{-1}d^{-1}$ ) no ensaio B atingiram os valores com intensidade luminosa de 45, 113, 60, 18 e 30 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), atingindo os valores no C45B de  $(1,114 \pm 0,573)$ , no nono dia, no C113 de  $0,736 \pm 0,142 gL^{-1}d^{-1}$  no sexto dia, no C60 de  $0,401 \pm 0,211 gL^{-1}d^{-1}$ , no sexto dia, no C18 de  $(0,253 \pm 0,012 gL^{-1}d^{-1}$  no nono dia e no C30B  $0,230 \pm 0,126 gL^{-1}d^{-1}$  no nono dia.

O maior aumento de concentração se deve na fase exponencial onde a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo, consequentemente aumentando sua produtividade.

A Figura 12 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 34 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 35 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

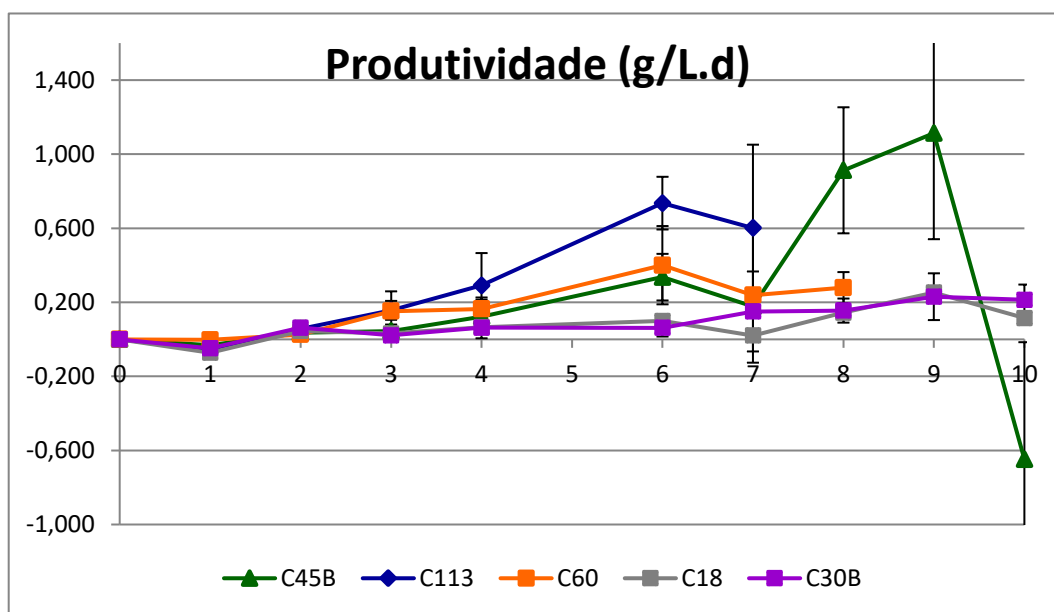


Figura 12 - Produtividade primeiro grupo de ensaio B

#### 4.2.3. Evolução do consumo de nitrato diário no primeiro grupo de ensaio B.

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3. Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

As maiores evoluções do consumo de nitrato (mg/L d) no ensaio a atingiu os valores com intensidade luminosa de 112,5, 45, 17,5, 60 e 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) com 100% do iluminação, atingindo os valores no C113 de  $(157,477 \pm 19,549)$  (mg/L d), no sexto dia, no C45B de  $(113,721 \pm 23,256)$  (mg/L d) no sétimo dia, no C60 de  $(87,188 \pm 4,423)$  (mg/L d), no sétimo dia, no C30B  $(70,969 \pm 8,154)$  (mg/L d) segundo dia. e o C18 de  $(51,178 \pm 3,087)$  (mg/L d) no nono dia. Quanto melhores as taxas de crescimento mais há necessidade de nutrientes.

A Figura 13 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário de nitato nos reatores, em triplicado, sob as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 37 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B. A Tabela 38 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B, após tratamento de dados.

A Tabela 38 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 39 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

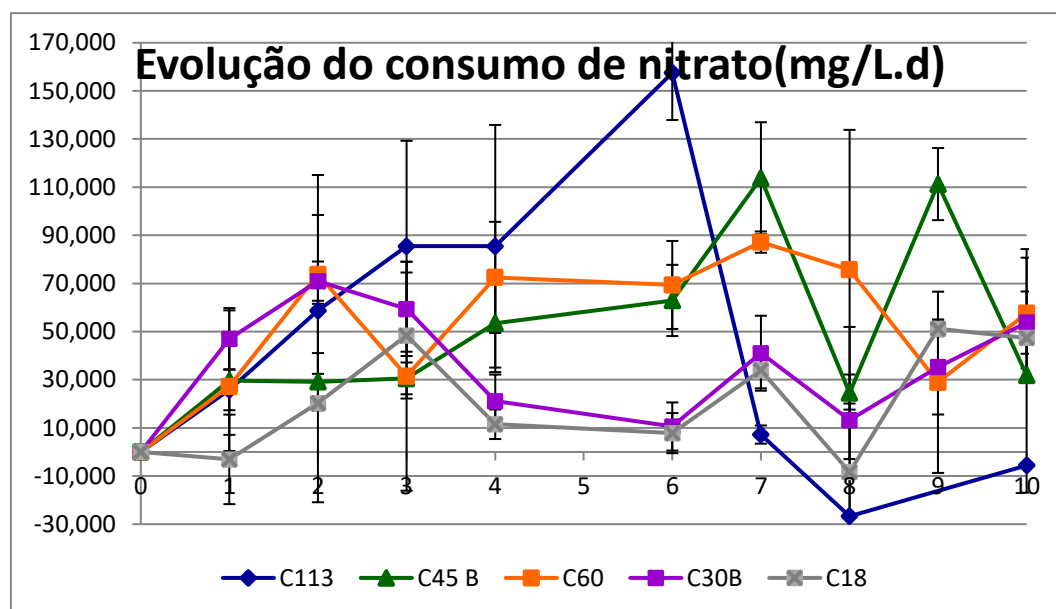


Figura 13 - Evolução do consumo de nitrato do ensaio B

#### 4.2.4. Pigmento do primeiro grupo de ensaio B

A concentração do pigmento clorofila-*a* no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $67,967 \pm 14,365$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $27,100 \pm 4,557$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $23,067 \pm 6,658$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $1,400 \pm 0,100$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $0,0833 \pm 0,306$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A Tabela 85 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio B.

A Tabela 86 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio B.

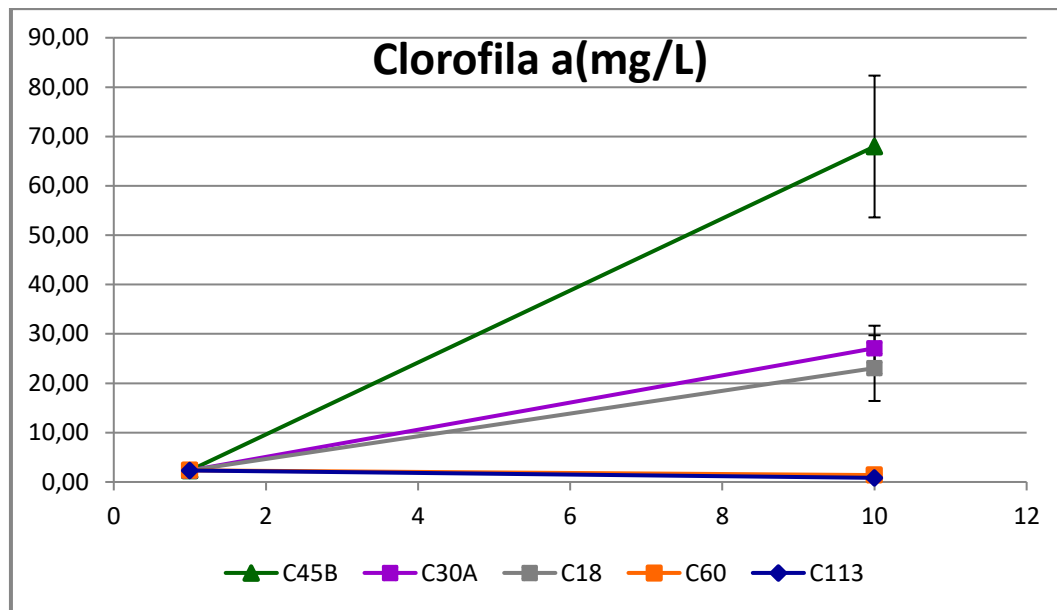
A Tabela 87 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio B.

A Tabela 88 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio B.

A Tabela 89 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio B.

A Tabela 90 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio B.

A Figura 14 demonstra o perfil de pigmento da clorofila-*a* do ensaio B.



**Figura 14 - Demonstração do pigmento clorofila-a do ensaio B**

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $24,533 \pm 6,803$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

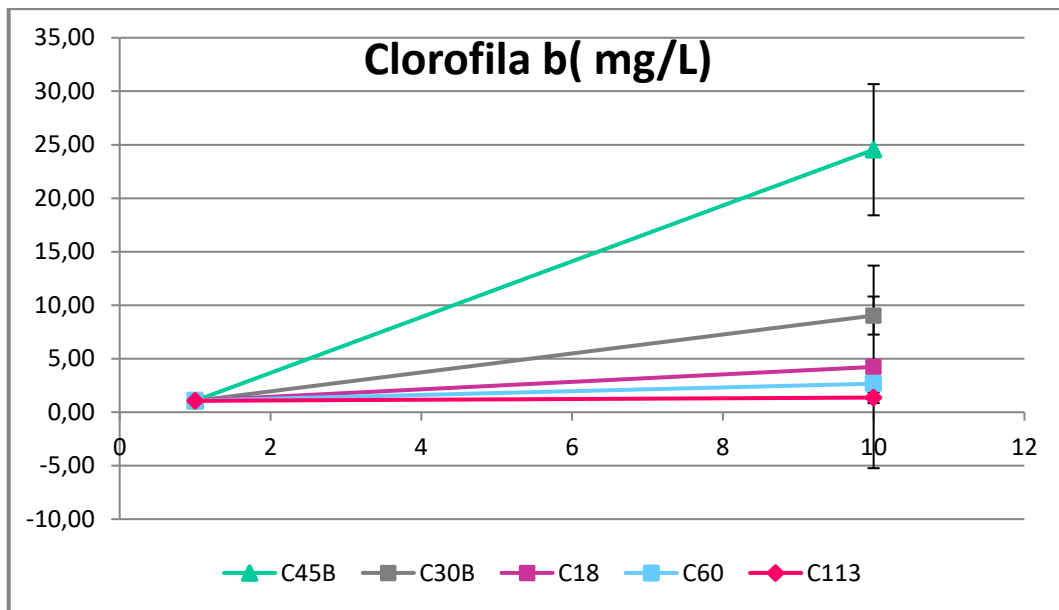
A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $9,033 \pm 1,779$ ) (mg/L., no décimo dia do ensaio B

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $4,233 \pm 9,471$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $2,667 \pm 0,379$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $1,367 \pm 0,513$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A Figura 15 demonstra o perfil de pigmento da clorofila-*b* do ensaio B.



**Figura 15 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-*b* ao longo do ensaio B**

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $17,440 \pm 4,754$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $6,713 \pm 1,082$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $6,690 \pm 0,375$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $-0,070 \pm 0,010$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $-0,090 \pm 0,017$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A Figura 16 demonstra o perfil de pigmento carotenóide do ensaio B.

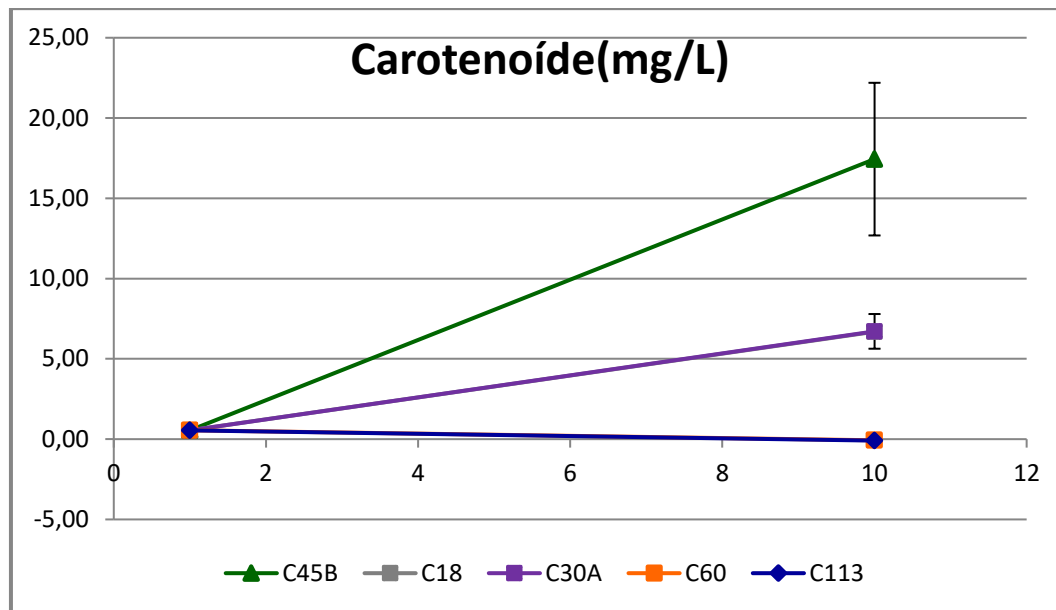


Figura 16 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenóide ao longo do ensaio B

### 4.3. Parametros de crescimento cinético dos ensaios A e B

#### 4.3.1. Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio A e B

Os resultados apresentados entre as melhores condições entre os ensaios A e B do primeiro grupo de experimento apresentaram as seguintes condições:

As taxas de crescimento dos resultados do primeiro grupo de ensaios A e B estão demonstradas na Figura 17, as intensidades luminosas de 150, 112,5, 60, 30B, 45B, 17,5, 75, 30A, 5 e 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com 100% de iluminação atingiram os valores máximos no ensaio C150 de  $(0,894 \pm 0,340)$ , ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia, no C113 de  $(0,796 \pm 0,200)$   $\text{d}^{-1}$ , terceiro dia, no C60 de  $(0,663 \pm 0,318)$   $\text{d}^{-1}$ , no terceiro dia, no C30B de  $(0,631 \pm 0,450)$   $\text{d}^{-1}$ , no segundo dia, no C45 B de  $(0,621 \pm 0,333)$   $\text{d}^{-1}$  no oitavo dia, no C18 de  $(0,618 \pm 0,188)$   $\text{d}^{-1}$ , no segundo dia, no C75 de  $(0,558 \pm 0,203)$   $\text{d}^{-1}$ , no terceiro dia, no C30A de  $(0,388 \pm 0,064)$   $\text{d}^{-1}$ , no sétimo dia no C5 de  $(0,242 \pm 0,200)$   $\text{d}^{-1}$ , no sétimo dia, no C0 de  $(0,209 \pm 0,183)$   $\text{d}^{-1}$ , no nono dia.

No início do ensaio houve a fase de Indução ou fase de Lag onde houve a adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular, ocorrendo a diminuição da taxa de crescimento.

As melhores taxas de crescimento foram obtidas com intensidades luminosas maiores. As

intensidades luminosas menores causaram fotoinibição as microalgas.

As mudanças nas condições ambientais podem, portanto ser definido com base na resposta que a célula sofre como resultado da mudança detectada seja um fator de limitação ou de estresse, que ocorreu entre com intensidade luminosa menor.

Pode-se perceber a fase exponencial ou fase Log, nesta fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo.

A fase de diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado. Esta fase deve-se a diminuição de nutrientes que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, consequentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial.

Na fase estacionária. não há variação da densidade celular, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular.

A Tabela 70 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados dos ensaios A e B.

As intensidades luminosas 75, 30B, 17,5 tiveram comportamento diferentes das demais, o que não mostrou que intensidades luminosas maiores favorecem as taxas de crescimento.

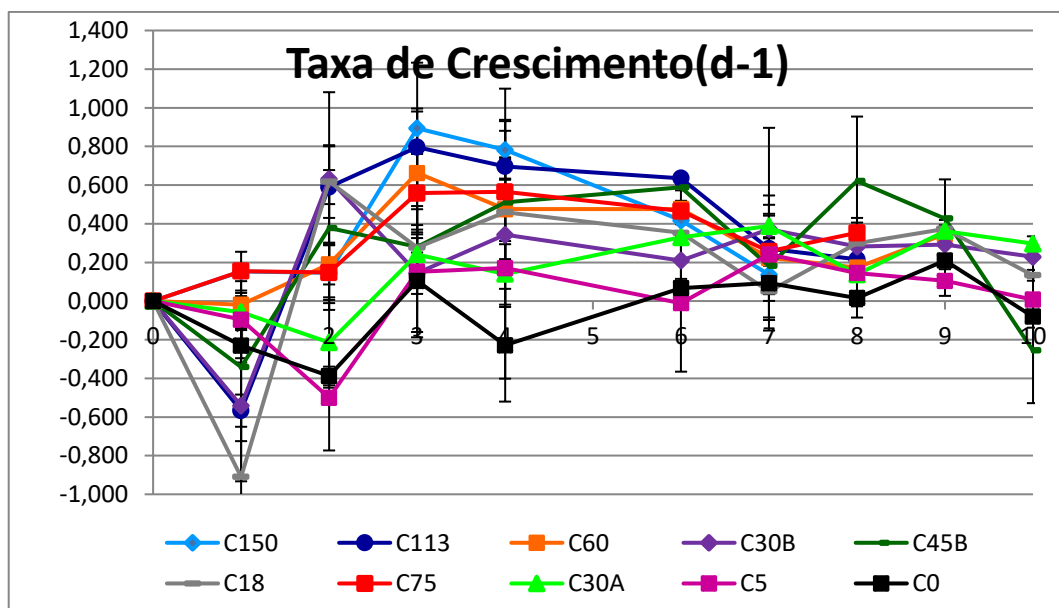


Figura 17 - Taxa de crescimento dos ensaios A e B

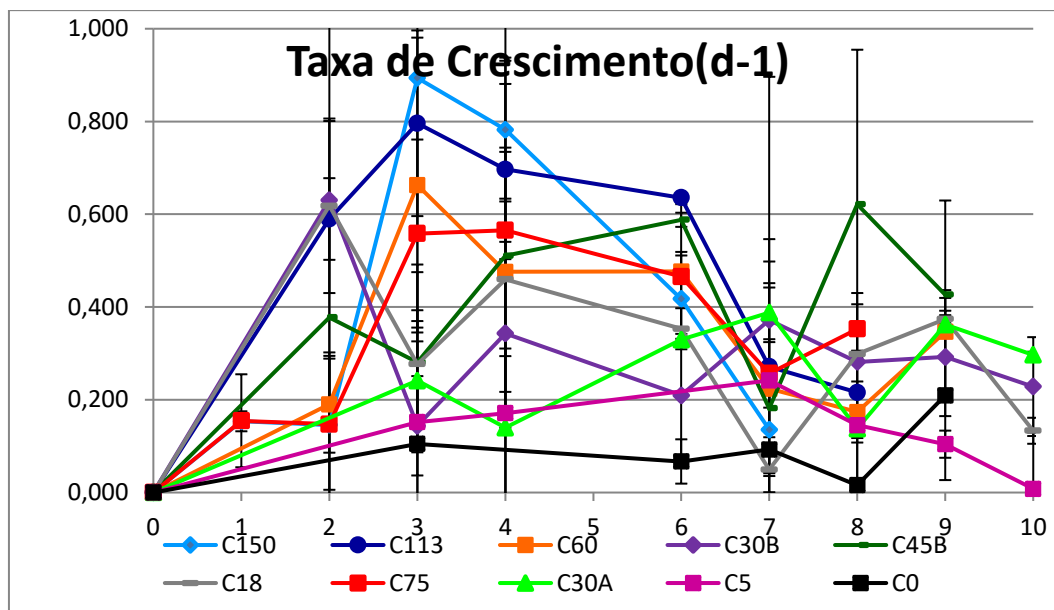


Figura 18 - Taxa de crescimento do ensaio A e B positiva

#### 4.3.2. Produtividade dos ensaios A e B.

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro do mesmo tempo de cultivo, demonstrado na Equação 2.

As maiores taxas de produtividade ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) dos resultados dos ensaios do primeiro grupo A e B atingiram os valores com intensidades luminosas de, 45, 112,5, 75, 150, 60, 18, 30,5 e 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), atingindo os valores no C45 de  $(1,114 \pm 0,573)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ), no nono dia, no C113 de  $(0,736 \pm 0,142)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no sexto dia, no C75 de  $(0,689 \pm 0,038)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ), no oitavo dia, no C150 de  $(0,563 \pm 0,109)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no sexto dia, no C60  $(0,401 \pm 0,211)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no sexto dia, no C18 de  $(0,253 \pm 0,012)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no nono dia no C30B de  $(0,230 \pm 0,126)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no nono dia, no C30A de  $(0,206 \pm 0,016)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no décimo dia, no C5 de  $(0,031 \pm 0,073)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no quarto dia, no C0 de  $(0,016 \pm 0,014)$  ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no nono dia, respectivamente.

Percebe-se que as intensidades luminosas de 150, 112,5, 75 e 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) tiveram taxas de produtividade inferior ao de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), onde atingiram sua saturação.

A Figura 19 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições dos resultados dos ensaios A e B do primeiro grupo.

A Tabela 70 representa os resultados da média e o desvio padrão da produtividade dos resultados dos ensaios A e B.

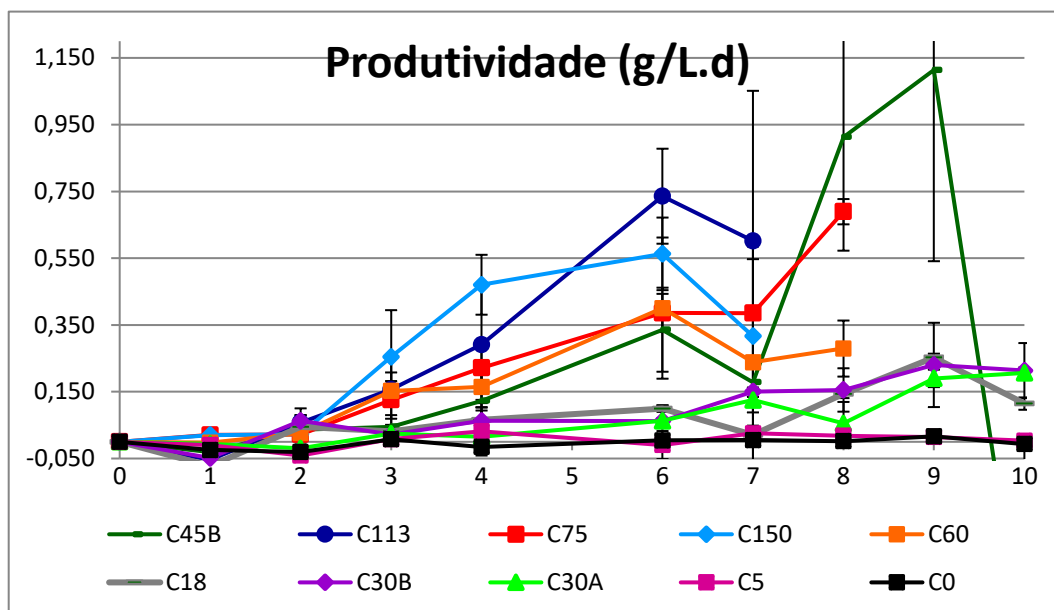


Figura 19 - Taxa de produtividade do ensaio A e B

#### 4.3.3. Evolução do consumo de nitrato dos ensaios A e B

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3: Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A evolução do consumo de nitrato foi demonstrado na Figura 20, onde os maiores consumos de nitrato foram nos reatores C150 e C113 ( $158,894 \pm 23,373$ ), ( $157,477 \pm 19,549$ ) mg/Ld, no quarto e sexto dia respectivamente, devido a grandes intensidades luminosas e aumento das taxas de crescimento, e os menores consumos foram nos reatores C0 e C18 ( $2,467 \pm 5,685$ ), ( $7,826 \pm 8,336$ ) mg/L d, ambos no sexto dia, que quanto maior taxa de crescimento maior é a evolução do consumo de nitrato. Nota-se que os reatores C0, C5 e C18 não houve alteração do consumo de nitrato, se mantendo constante ao longo do ensaio, isto porque não houve aumento na taxa de crescimento devido à intensidade luminosa ser baixa.

Com o aumento da densidade microalgal houve necessidade de mais consumo de nutrientes, o que justifica que as maiores intensidades luminosas favoreceram as taxas de

crecimento e conseqüentemente aumentam a necessidade de nutrientes, se produziu mais, conseqüentemente consumiu mais.

A Tabela 72 representa os resultados da média e o desvio padrão da evolução do consumo específico de nitrato dos resultados dos ensaios A e B.

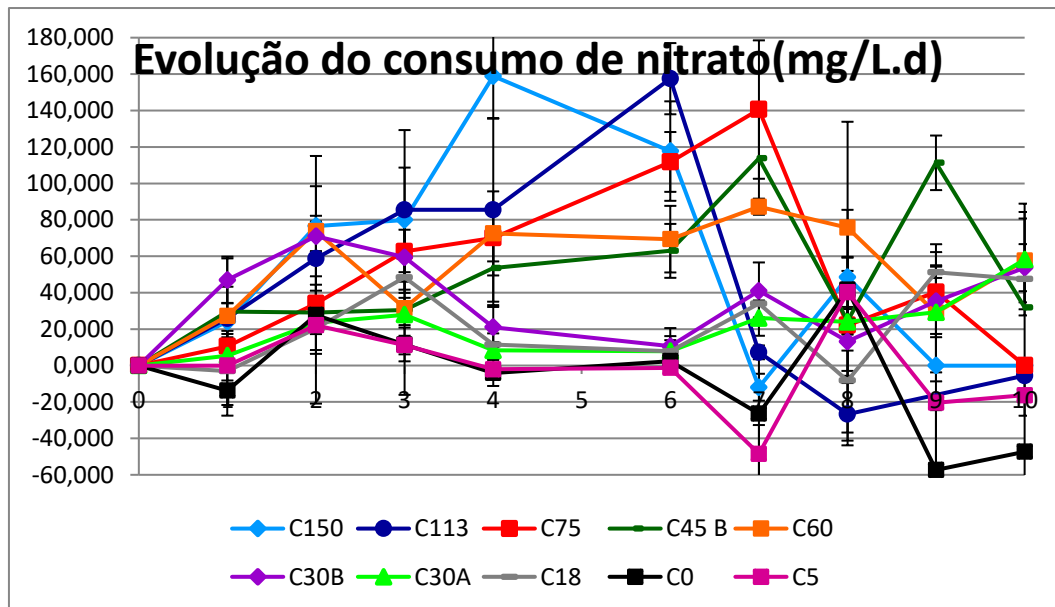


Figura 20 - Consumo específico de nitrato do ensaio A e B

#### 4.3.4. Pigmento dos ensaios A e B

A concentração do pigmento clorofila-*a* no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $67,967 \pm 14,365$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $60,333 \pm 2,581$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $46,667 \pm 6,332$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $40,767 \pm 7,922$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $34,600 \pm 5,761$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $27,100 \pm 4,557$ ) (mg/L) no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $23,067 \pm 6,658$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $22,067 \pm 5,564$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $1,400 \pm 0,100$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $0,0833 \pm 0,306$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A produção de pigmento foi favorável com intensidade luminosa intermediária.

A Tabela 103 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) da clorofila-*a* do ensaio A e B.

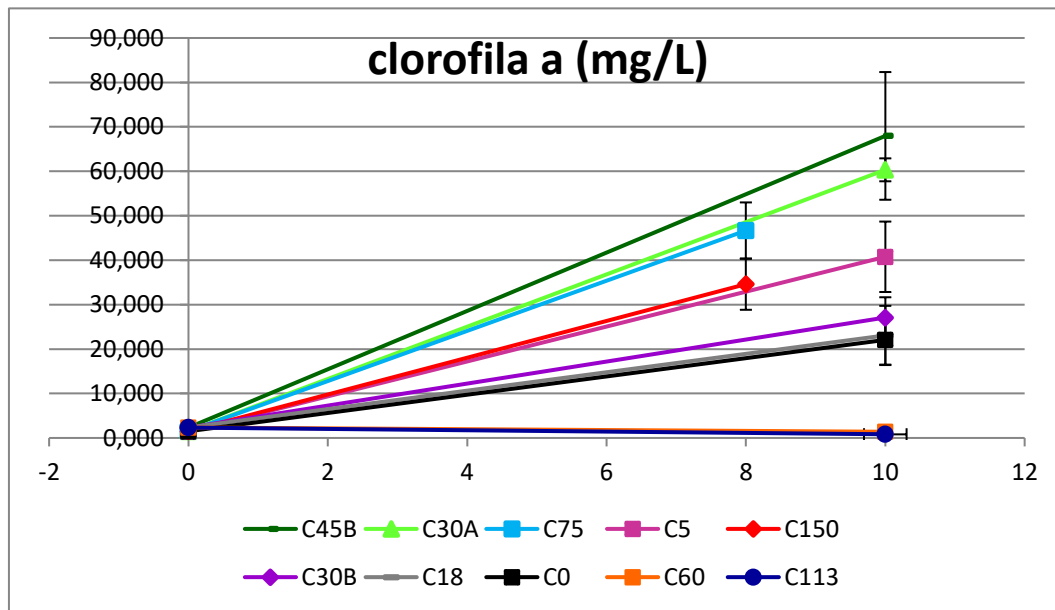
A Tabela 104 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) da clorofila-*b* do ensaio A e B.

A Tabela 105 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) do carotenóide do ensaio A e B.

A Figura 21 demonstra os resultados dos ensaios A e B do pigmento clorofila-*a*.

A Figura 22 demonstra os resultados dos ensaios A e B do pigmento clorofila-*b*.

A Figura 23 demonstra os resultados dos ensaios A e B do pigmento carotenóide.



**Figura 21 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-a ao longo do ensaio A e B**

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $24,767 \pm 0,666$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $24,533 \pm 6,133$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $20,033 \pm 3,272$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $18,333 \pm 2,325$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $13,600 \pm 2,571$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

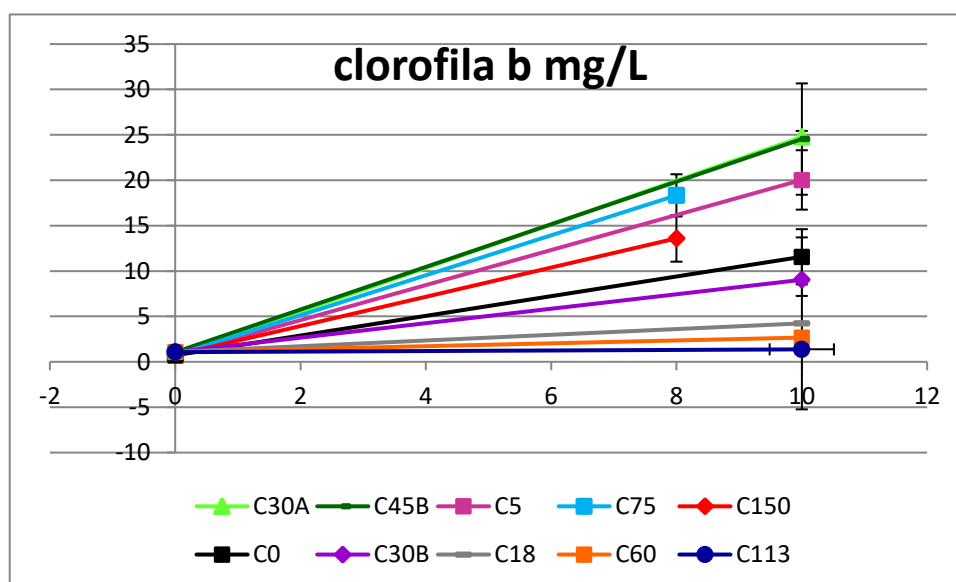
A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $11,567 \pm 3,044$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $9,033 \pm 1,779$ ) (mg/L) no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $4,233 \pm 9471$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* no ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $2,667 \pm 0,379$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $1,367 \pm 0,513$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.



**Figura 22 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila b ao longo do ensaio A e B**

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $17,440 \pm 4,754$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $14,167 \pm 0,833$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $12,700 \pm 2,287$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $13,000 \pm 2,651$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $10,767 \pm 2,294$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $6,713 \pm 1,082$ ) (mg/L) no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $6,690 \pm 0,375$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $5,867 \pm 1,387$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $-0,070 \pm 0,010$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $-0,090 \pm 0,017$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

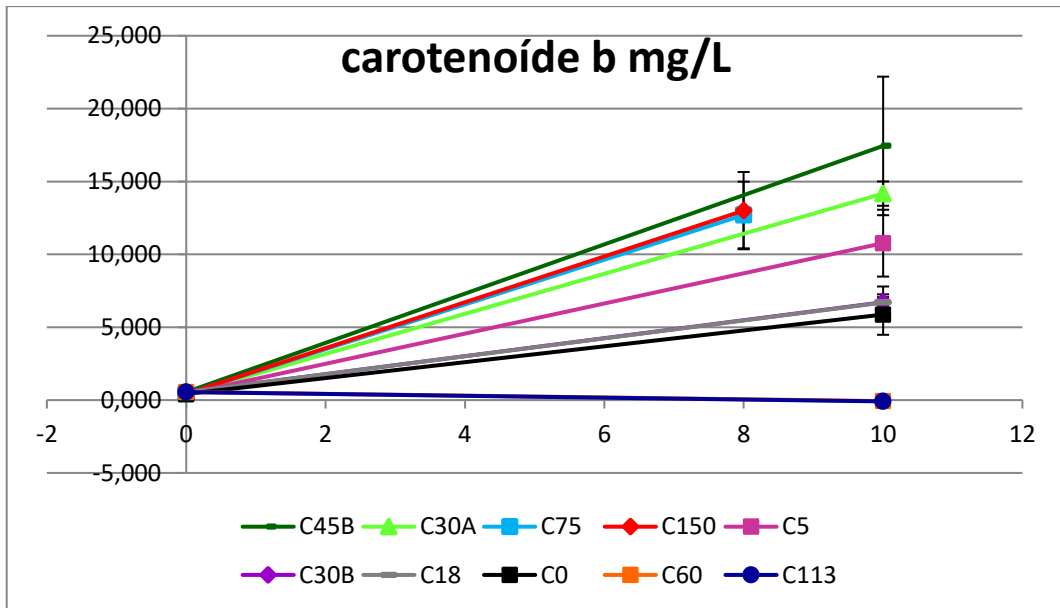


Figura 23 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenoíde ao longo do ensaio A e B



## 5. Resultados e discussões do segundo ensaio

No primeiro grupo de ensaio A e B, observamos que com intensidades de luzes maiores obtêm-se taxas de crescimento maiores. Quanto maior a intensidade luminosa maior a capacidade de melhorar as taxas de crescimento até atingirem seu ponto de saturação. No segundo grupo de experiências, com os ensaios C, D e E foi utilizada a mesma intensidade luminosa média, no caso de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , e ciclo de iluminação diferente, pois ainda não atingiu seu ponto de saturação e, comparar com a mesma intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% para analisar o comportamento da absorção luminosa com ciclo luminoso constante e variável, nas taxas de crescimento.

### 5.1. Parametros de crescimento cinético do ensaio C

#### 5.1.1. Taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio C

A concentração de biomassa foi utilizada para determinar a taxa de crescimento específico diária ( $\mu$ ,  $\text{d}^{-1}$ ). As taxas de crescimento específicas foram determinadas de acordo com a Equação 1: As maiores taxas de crescimento no ensaio C, com ciclo de iluminação de 75% e fotoperíodo claro e escuro (0,375 ms e 0,125 ms), (atingiu o valor com intensidades

luminosas de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , o valor no P500C75 de  $(0,600 \pm 0,047) \text{ (d}^{-1})$ , no quarto dia. Os demais reatores foram descartados.

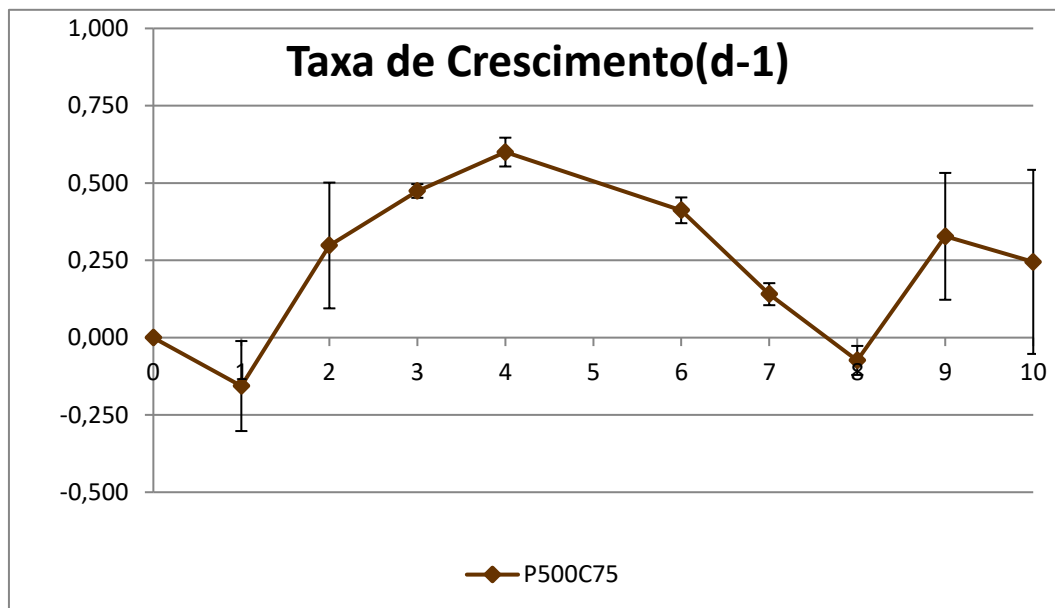
A Figura 24 demonstra a média e o desvio padrão das taxas de crescimento específicas do peso seco (DW), nos reatores em triplicado sobre a mesma condição do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 40 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio C.

A Tabela 41 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio C.

A Tabela 42 demonstra a taxa de crescimento ( $\text{d}^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 43 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $\text{d}^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.



**Figura 24 - Taxa de crescimento do ensaio C**

No início do ensaio até o primeiro dia houve a fase de Indução ou Fase de Lag onde houve a adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular.

Pode se perceber entre o primeiro até o quarto dia a fase exponencial ou Fase Log, nesta: fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo, e conseqüentemente a fase de diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado, nesta fase deve-se a diminuição de nutrientes que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, conseqüentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial.

Na fase estacionária. não há variação da densidade celular, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular.

### **5.1.2. Produtividade do ensaio C**

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro do mesmo tempo de cultivo, demonstrado na Equação 2.

As maiores taxas de produtividade ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) no ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), no P500C75 ( $0,420 \pm 0,310$ ) ( $\text{gL}^{-1}\text{d}^{-1}$ ), no nono dia.

A Figura 25 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 43 demonstra a produtividade diária de cada (PBR) ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 45 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.

Os reatores #1, #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, #9, #13, #14 e #15 foram descartados.

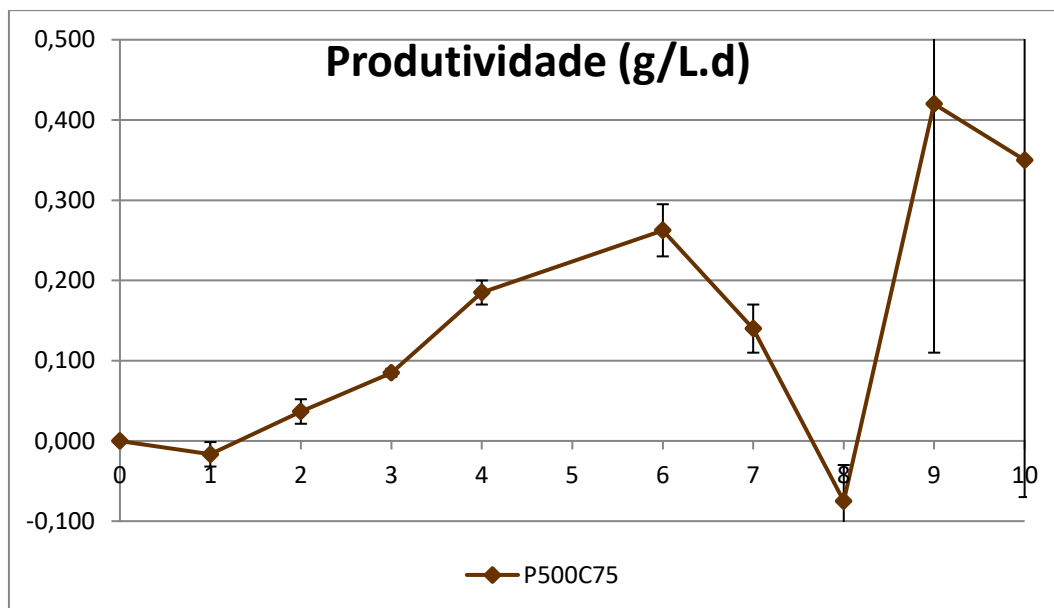


Figura 25 - Produtividade do segundo grupo de ensaio C

### 5.1.3. Evolução do consumo diário de nitrato do segundo ensaio C

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3:

Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A evolução do consumo de nitrato foi demonstrado na Figura 26, onde o maior consumo de nitrato ocorreu no reator P500C75 ( $147,000 \pm 62,746$ ), (mg/L d), no sétimo dia.

A Tabela 46 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 47 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio C, após tratamento de dados.

A Tabela 48 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 49 Tabela 39 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.

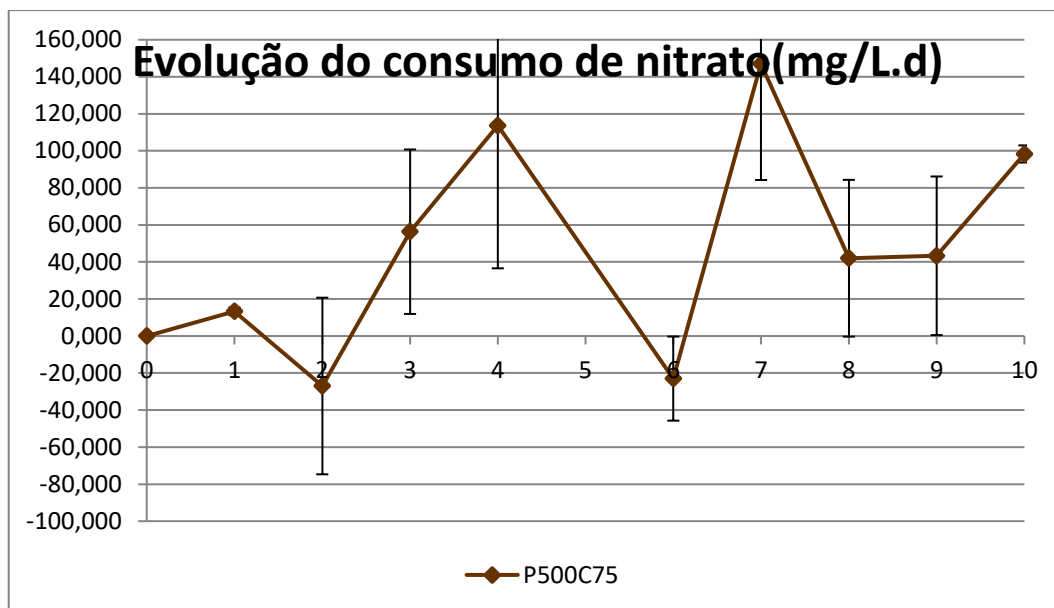


Figura 26 - Evolução do consumo de nitrato do ensaio C

#### 5.1.4. Pigmento do segundo grupo de ensaio C

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de  $(52,207 \pm 21,485)$  (mg/L), no décimo dia.

A Tabela 106 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio C.

A Tabela 107 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio C.

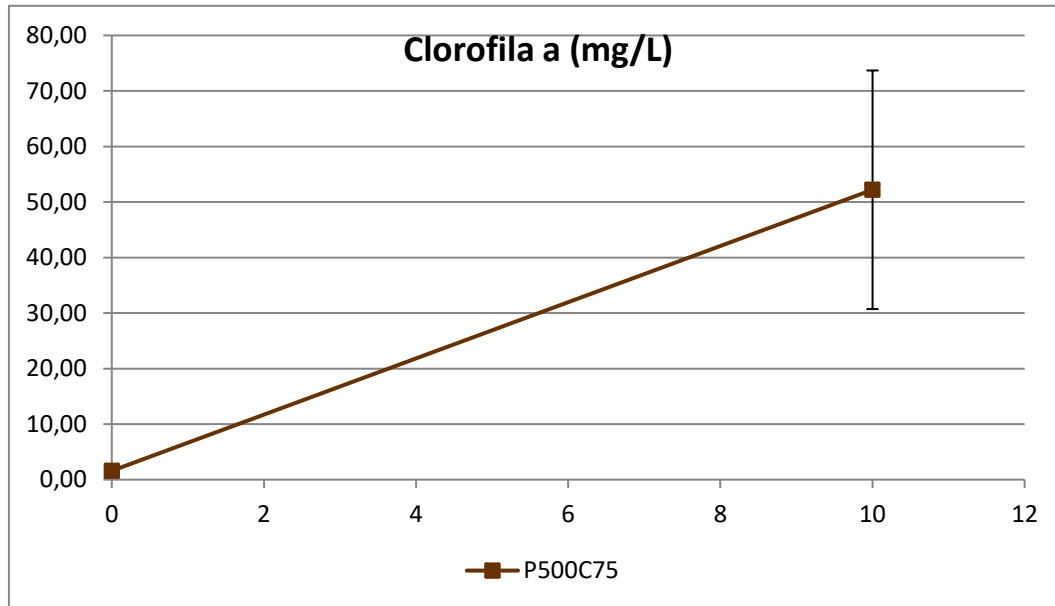
A Tabela 108 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio C.

A Tabela 109 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio C.

A Tabela 110 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio C.

A Tabela 111 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio C.

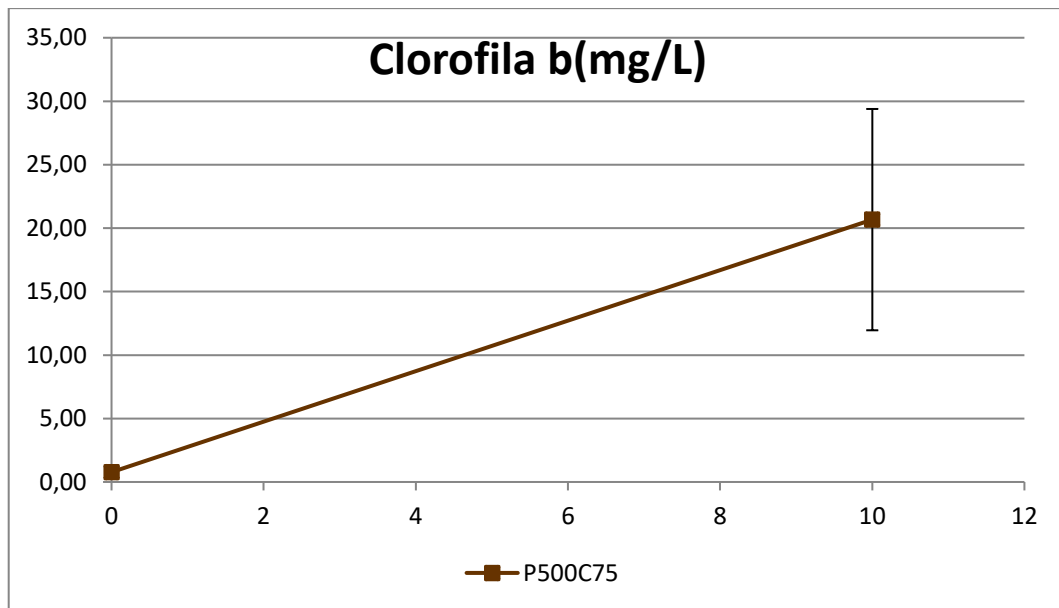
A Figura 27 demonstra o comportamento do pigmento clorofila-*a* ao longo do ensaio C.



**Figura 27 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-*a* ao longo do ensaio C**

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de  $(20,671 \pm 8,719) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia.

A Figura 28 demonstra o comportamento do pigmento clorofila-*b* ao longo do ensaio C.



**Figura 28 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-*b* do ensaio C**

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de  $(13,050 \pm 4,876) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia.

A Figura 29 demonstra o comportamento do pigmento carotenóide ao longo do ensaio C.

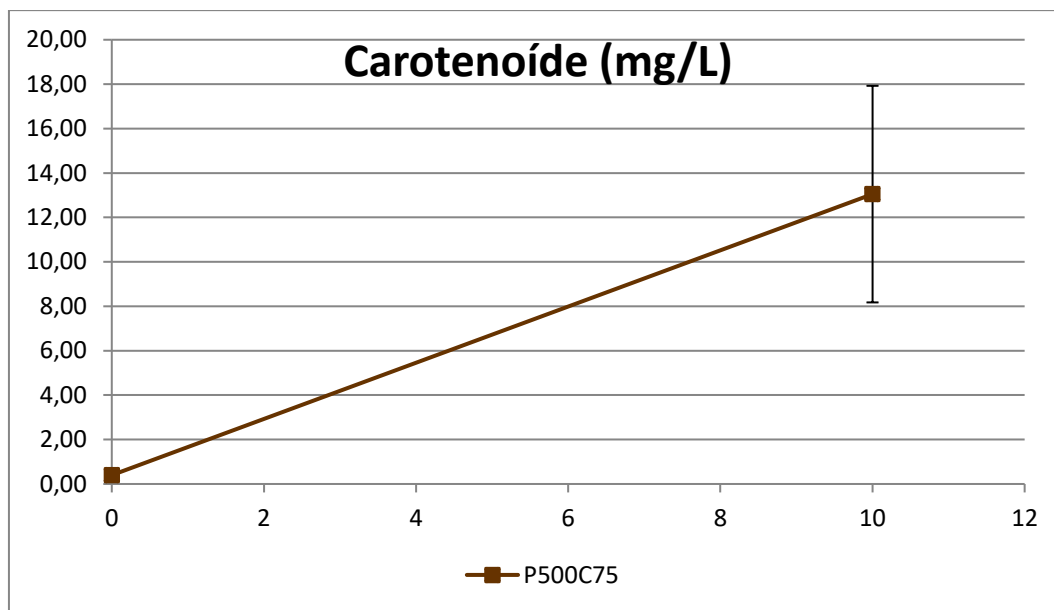


Figura 29 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenoídeo ao longo do ensaio C

## 5.2. Parametros de crescimento cinetico do ensaio D

### 5.2.1. Taxa de crescimento dose segundo grupo de ensaio D

A concentração de biomassa foi utilizada para determinar a taxa de crescimento específico diária ( $\mu$ ,  $d^{-1}$ ). As taxas de crescimento específicas foram determinadas de acordo com a Equação 1.

A maior taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 15 e 45 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,882 \pm 0,0967)$  ( $d^{-1}$ ) no P60C25, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 7,5 e 22,5 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,782 \pm 0,474)$  ( $d^{-1}$ ), no P30C25, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,755 \pm 0,188)$  ( $d^{-1}$ ), no P500C50, no oitavo dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 22,5 min e 7,5 min, respectivamente, e ciclo

de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(0,693 \pm 0,000)$  ( $d^{-1}$ ), no P30C75, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 15 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50 de  $(0,508 \pm 0,225)$  ( $d^{-1}$ ), no nono dia.

A Tabela 50 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio D.

A Tabela 51 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio D.

A Tabela 52 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio D.

A Tabela 53 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

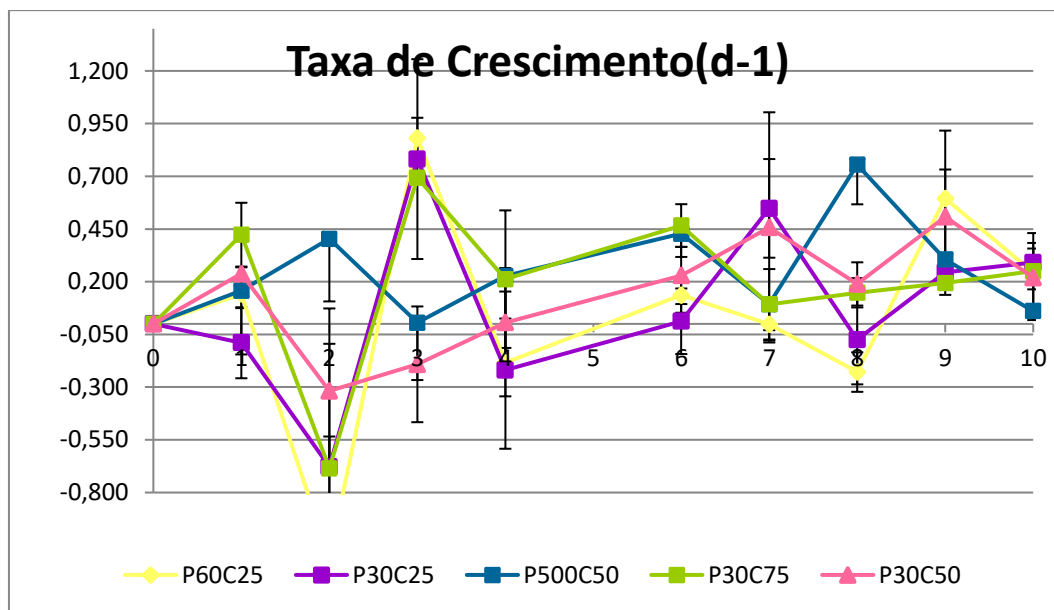


Figura 30 - Taxa de crescimento do segundo grupo de ensaio D

### 5.2.2. Produtividade do ensaio D

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro de um mesmo tempo de cultivo, como mostrado na Equação 2.

A maior produtividade do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de  $(0,827 \pm 0,131) (\text{g/L.d})$ , no oitavo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (22,5min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de  $(0,290 \pm 0,225) (\text{g/L.d})$ , no décimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de  $(0,200 \pm 0,089) (\text{g/L.d})$ , no nono dia

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(0,090 \pm 0,062) (\text{g/L-1d-1})$ , no nono dia.

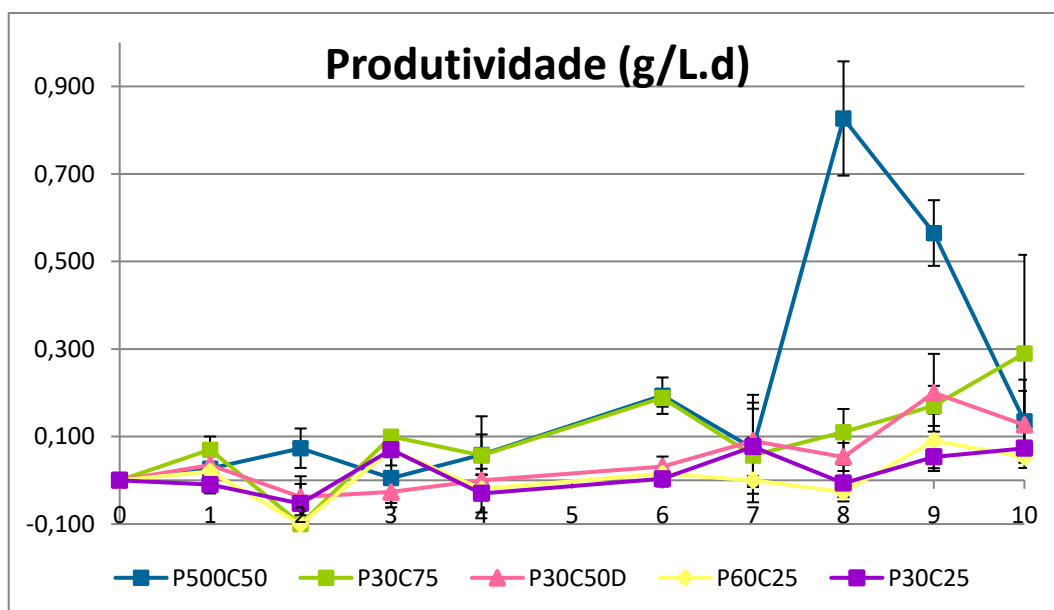
A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de (0,077  $\pm$ 0,021) (gL-1d-1) , no sétimo dia.

A Figura 31 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio D.

A Tabela 51 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do segundo grupo de ensaio D.

A Tabela 52 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

Nota-se que a maior produtividade é maior onde os periodos de iluminação são maiores. Os fotoperíodos onde o ciclo de iluminação escuro é maior obtêm se menores taxas de produtividade.



**Figura 31 - Pprodutividade segundo grupo de ensaio D**

### 5.2.3. Pigmento do segundo grupo de ensaio D

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $38,667 \pm 1,570$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $31,060 \pm 2,231$ ), (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $11,227 \pm 1,233$ ) (mg L<sup>-1</sup>) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $5,583 \pm 2,005$ ) (mg./L.d.), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de ( $3,947 \pm 0,023$ ) (mg/L) , no décimo dia.

A Tabela 91 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio D.

A Tabela 92 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio D.

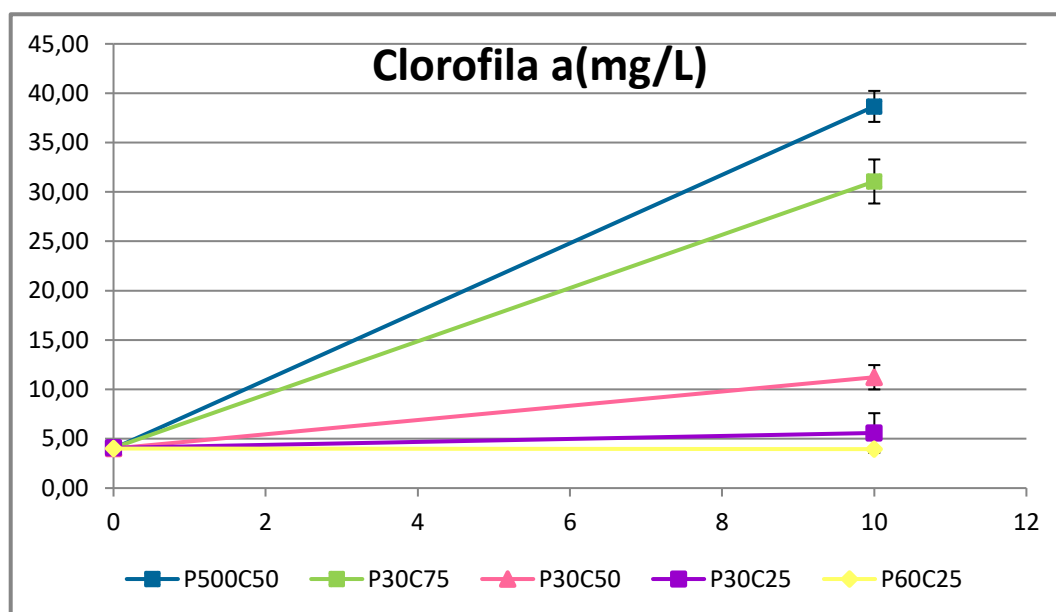
A Tabela 93 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio D.

A Tabela 94 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio D.

A Tabela 95 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio D.

A Tabela 96 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio D.

A Figura 32 demonstra o pigmento clorofila-*a* ao longo do ensaio D.



**Figura 32 - Demonstração do pigmento clorofila-*a* ao longo do ensaio D**

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $18,077 \pm 1,317$ ) (mg/L), no décimo dia.

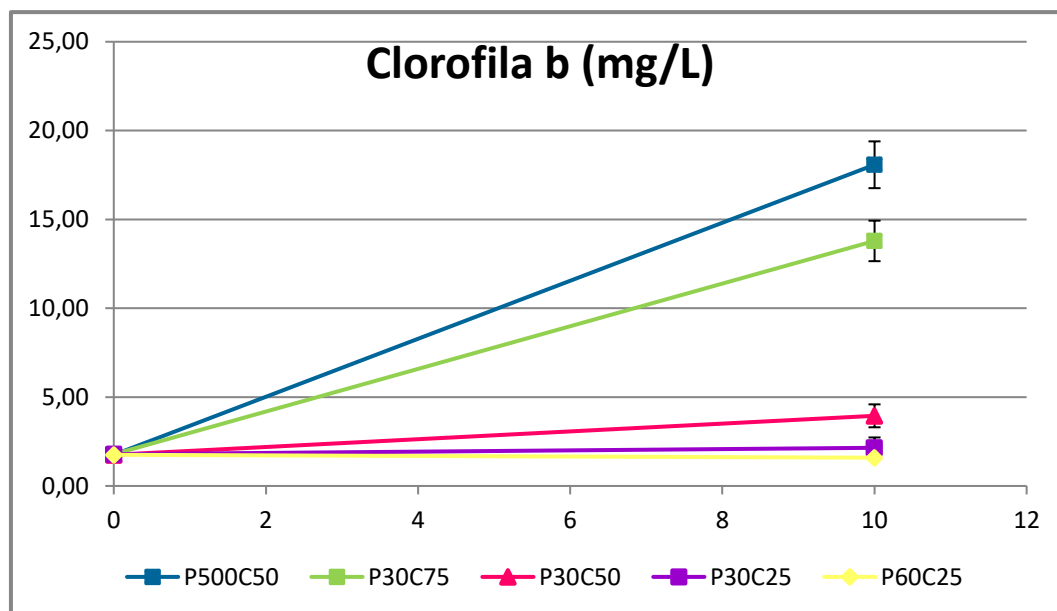
A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $13,790 \pm 1,139$ ), (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $3,947 \pm 1,233$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $2,147 \pm 0,582$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de ( $1,590 \pm 0,017$ ) (mg/L), no décimo dia

A Figura 33 demonstra o pigmento clorofila-*b* ao longo do ensaio D.



**Figura 33 - Demonstração do pigmento clorofila-*b* ao longo do ensaio D**

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $9,713 \pm 0,153$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 22,5 min e 7,5 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de ( $7,647 \pm 0,474$ ), (mg/L) no P30C75, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(3,343 \pm 0,264)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no P30C50D, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(1,977 \pm 0,497)$  ( $\text{mg/L d}$ ) no P30C25, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(1,317 \pm 0,046)$  ( $\text{mg/L}$ ) no P60C25, no décimo dia.

A Figura 34 demonstra o pigmento carotenóide ao longo do ensaio D.

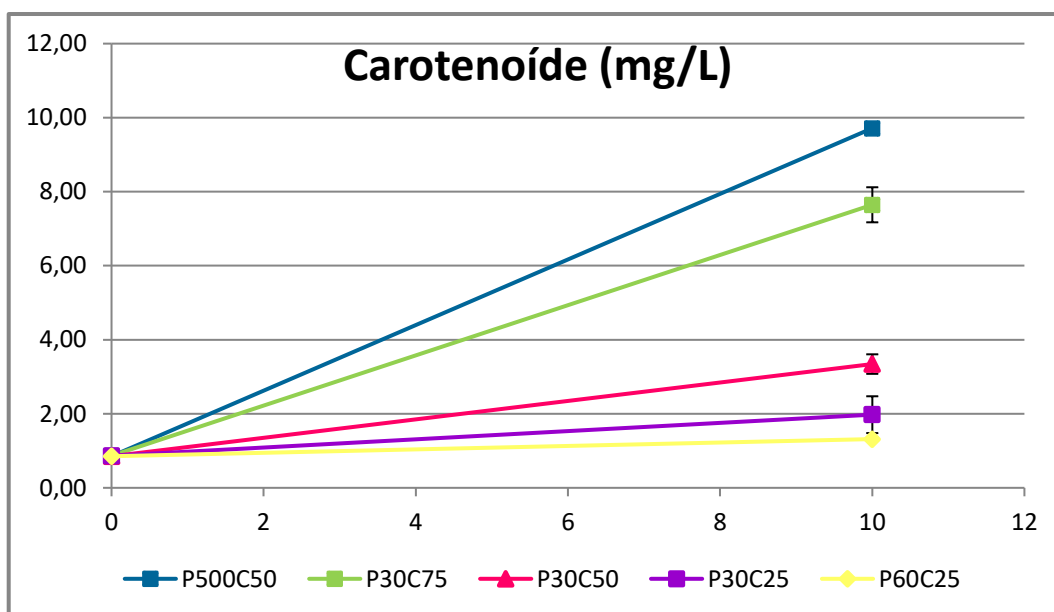


Figura 34 - Demonstração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio D

#### 5.2.4. Evolução do consumo de nitrato do segundo ensaio D

A evolução do consumo específico diário de nitrato (ECN), ( $\text{mg/L d}$ ) foi determinada de acordo com a Equação 3: Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de ( $154,667 \pm 20,429$ ) (mg/L d) no P30C75, no nono dia.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de ( $153,333 \pm 24,007$ ) (mg/L d) no P500C50, no nono dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de ( $64,333 \pm 33,650$ ) (mg/L d) no P30C50D, no nono dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de ( $56,333 \pm 79,034$ ) (mg/L d) no P60C25, no quarto dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de ( $38,333 \pm 9,238$ ) (mg/L d) no P30C25, no sétimo dia.

A Tabela 56 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do segundo grupo de ensaio D.

A Tabela 57 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio D, após tratamento de dados.

A

Tabela 58 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do segundo grupo de ensaio D.

A Tabela 59 mostra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

A Figura 35 demonstra o consumo diário de nitrato do segundo grupo de ensaio D.

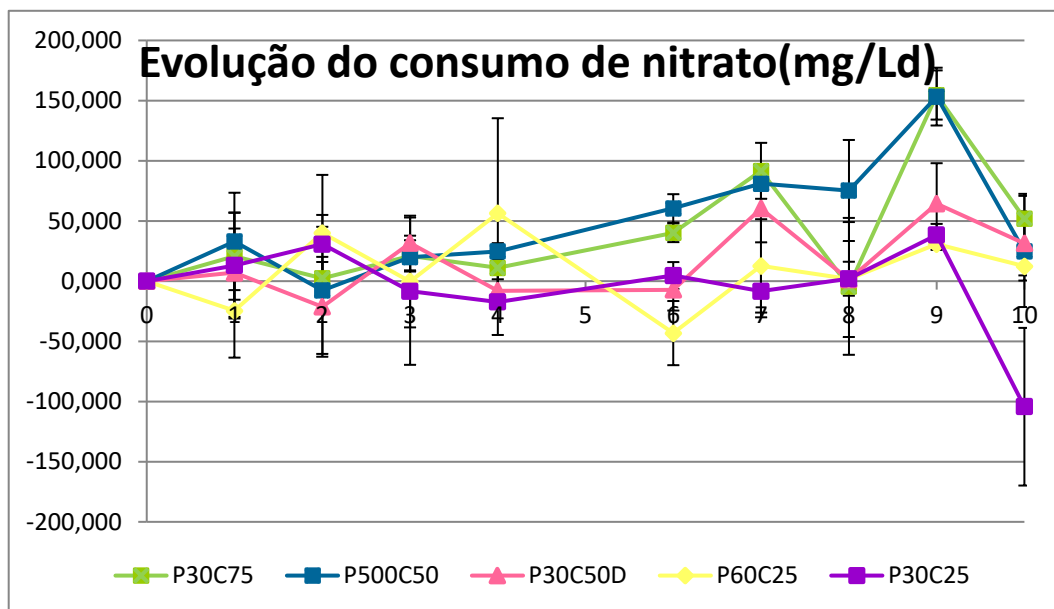


Figura 35 - Eevolução do consumo de nitrato do segundo grupo de ensaio D

### 5.3. Parametros de crescimento cinético do ensaio E

#### 5.3.1. Taxa de crescimento do segundo grupo de ensaio E

A concentração de biomassa foi utilizada para determinar a taxa de crescimento específico diária ( $\mu$ , d<sup>-1</sup>). As taxas de crescimento específicas foram determinadas de acordo com a Equação 1.

A maior taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(1,573 \pm 0,078)$  (d<sup>-1</sup>), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $1,177 \pm 0,736 \text{ d}^{-1}$  no P60C50, no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e

ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(1,055 \pm 0,044)$  ( $d^{-1}$ ), no P500C25, no terceiro dia.

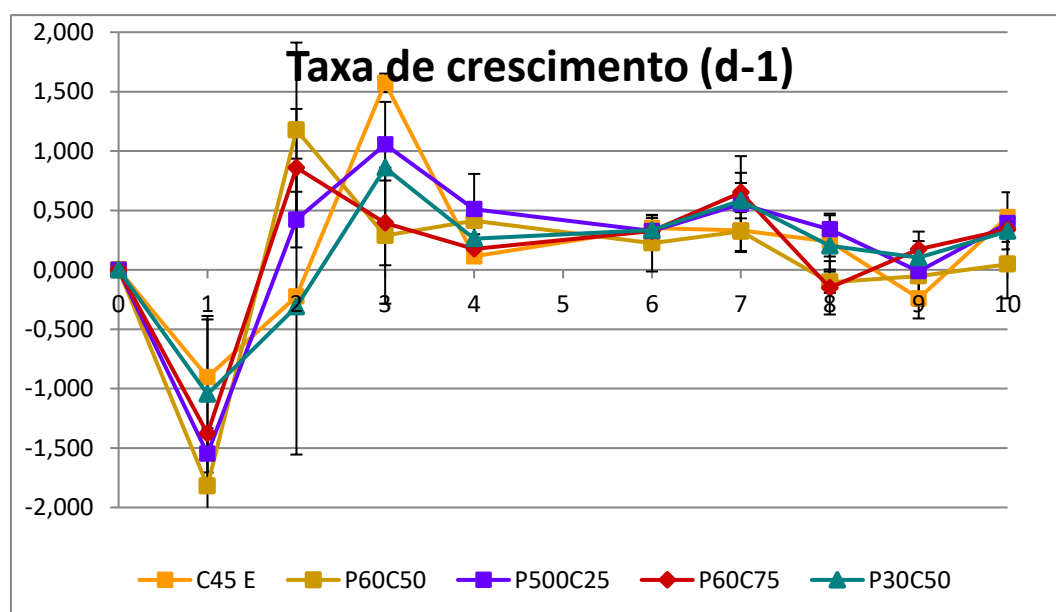
A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 45 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $0,860 \pm 0,494 d^{-1}$  no P60C75, no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de  $(0,858 \pm 0,555)$  ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. Nota-se que quanto maior o tempo de ciclo iluminado maior a taxa de crescimento. O fotoperíodo escuro atua como um fotoinibidor ao sistema de crescimento.

A Figura 36 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento específica do ensaio E.

A Tabela 60 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio E. A Tabela 61 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio E. A Tabela 62 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 63 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio E.



**Figura 36 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos reatores em triplicado do segundo grupo de ensaio E**

### **5.3.2. Produtividade do ensaio E**

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro de um mesmo tempo de cultivo, como mostrado na Equação 2.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $0,437 \pm 0,129$ ) (g/L d), no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $0,357 \pm 0,214$ ) (g/L d), no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $0,227 \pm 0,038$ ) (g/L d), no sétimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50 de ( $0,175 \pm 0,073$ ) (g/L d), no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de ( $0,078 \pm 0,013$ ) (g/L d), no sétimo dia.

A Figura 37 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 64 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 65 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio E.

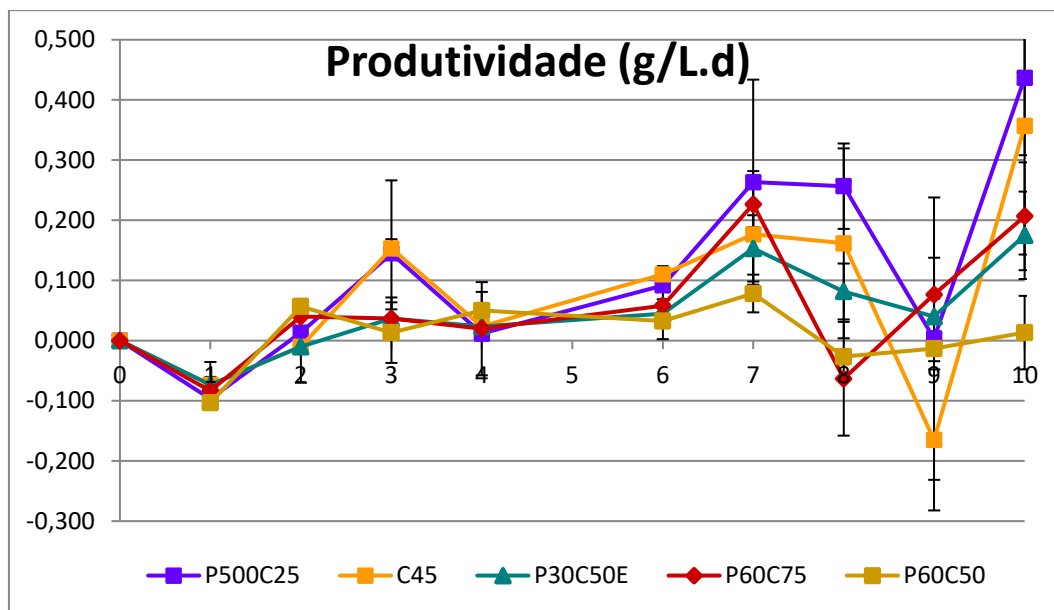


Figura 37 - Produtividade do segundo grupo de ensaio E

### 5.3.3. Evolução do consumo específico de nitrato do segundo ensaio E

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3. Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(155,667 \pm 26,102)$  (mg/L d), no quarto dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de  $(128,333 \pm 25,325)$  (mg/L d), no décimo dia

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(127,333 \pm 17,039)$  (mg/L d), no P30C50E, no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de

iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(122,167 \pm 35,286)$  (mg/L d), no P500C25, no quarto dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 30 min e 30 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(121,333 \pm 35,005)$  (mg/L d), no P60C50, no quarto dia.

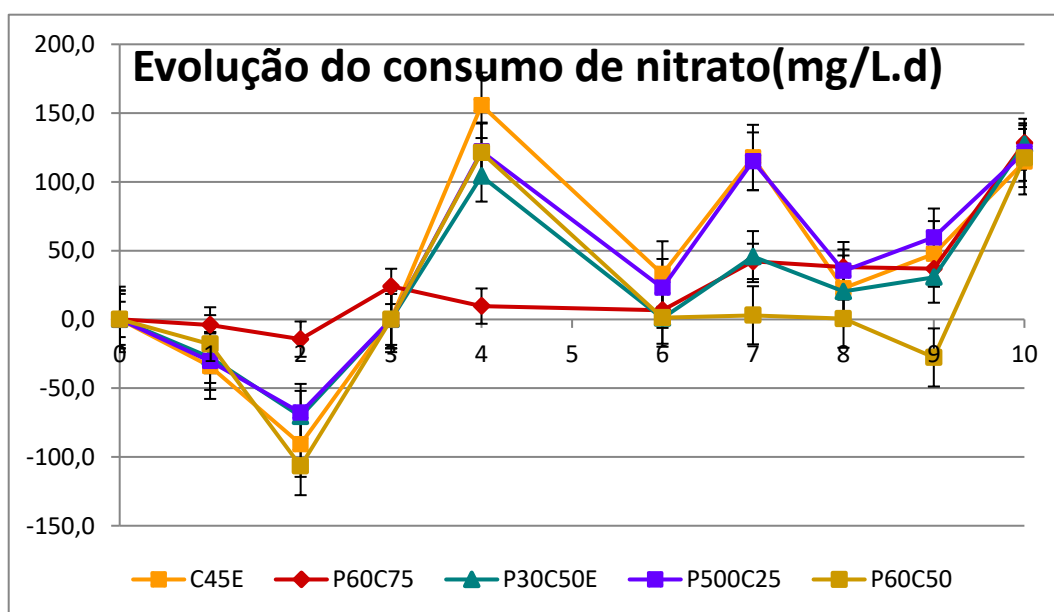
A Figura 38 demonstra a média e o desvio padrão do consumo específico de nitrato, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do segundo grupo de ensaio E.

ATabela 66 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio E.

ATabela 67 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio E, após tratamento de dados.

A Tabela 68 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 69 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio E.



**Figura 38 - Média e desvio padrão do consumo específico de nitrato nos reatores em triplicado do segundo grupo de ensaio E**

#### 5.3.4. Pigmento do segundo grupo de ensaio E

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de ( $25,663 \pm 4,178$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P500C25, no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $17,897 \pm 2,903$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de ( $11,830 \pm 0,871$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P60C75, no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $8,800 \pm 4,286$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de ( $4,410 \pm 1,022$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A Figura 39 demonstra o perfil do pigmento da clorofila-*a* do ensaio E. A Tabela 97 demonstra o perfil da concentração ( $\text{mg/L}$ ) do pigmento clorofila-*a* do ensaio E.

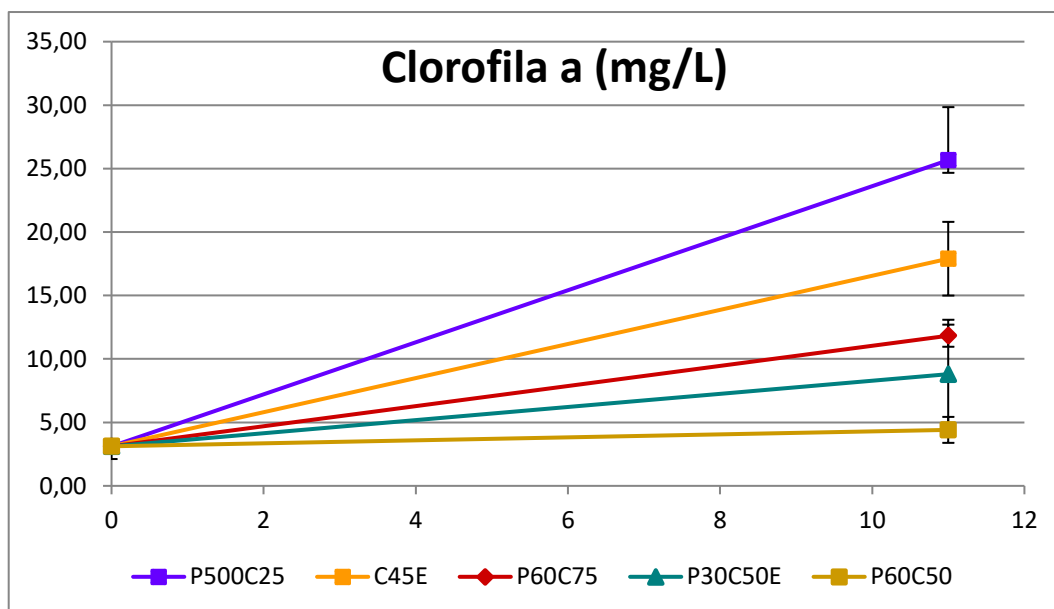
A Tabela 98 demonstra a média e desvio padrão da concentração ( $\text{mg/L}$ ) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio E.

Tabela 99 demonstra a concentração ( $\text{mg/L}$ ) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio E.

A Tabela 100 demonstra a média e desvio padrão da concentração ( $\text{mg/L}$ ) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio E.

A Tabela 101 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio E.

A Tabela 102 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio E.



**Figura 39 - Demonstração do pigmento clorofila-a E**

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(9,900 \pm 1,562)$  ( $\text{mgL}^{-1}$ ), no P500C25, no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(6,803 \pm 1,206)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

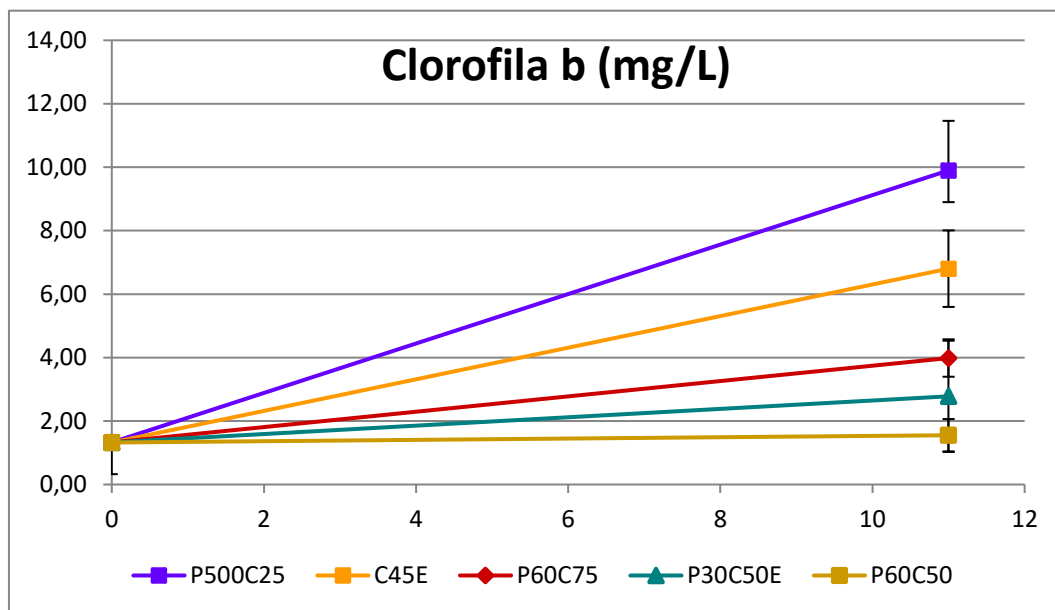
A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(3,987 \pm 0,590)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P60C75, no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min),

respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(2,7880 \pm 1,753)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P30C50E, no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(1,553 \pm 0,510)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P60C50, no décimo dia.

A Figura 40 demonstra o perfil do pigmento da clorofila-*b* do ensaio E.



**Figura 40 - Demonstração do pigmento clorofila b ao longo do ensaio E**

A concentração do pigmento carotenóide no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(6,577 \pm 0,909)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no P500C25, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(4,807 \pm 0,615)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min)

respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(3,277 \pm 0,278)$  (mg L<sup>-1</sup>), no P60C75, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(2,633 \pm 1,033)$  (mg L<sup>-1</sup>), no P30C50E, no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(1,490 \pm 0,195)$  (mg L<sup>-1</sup>), no P60C50, no décimo dia.

A Figura 41 demonstra o perfil do pigmento da clorofila-*a* do ensaio E.

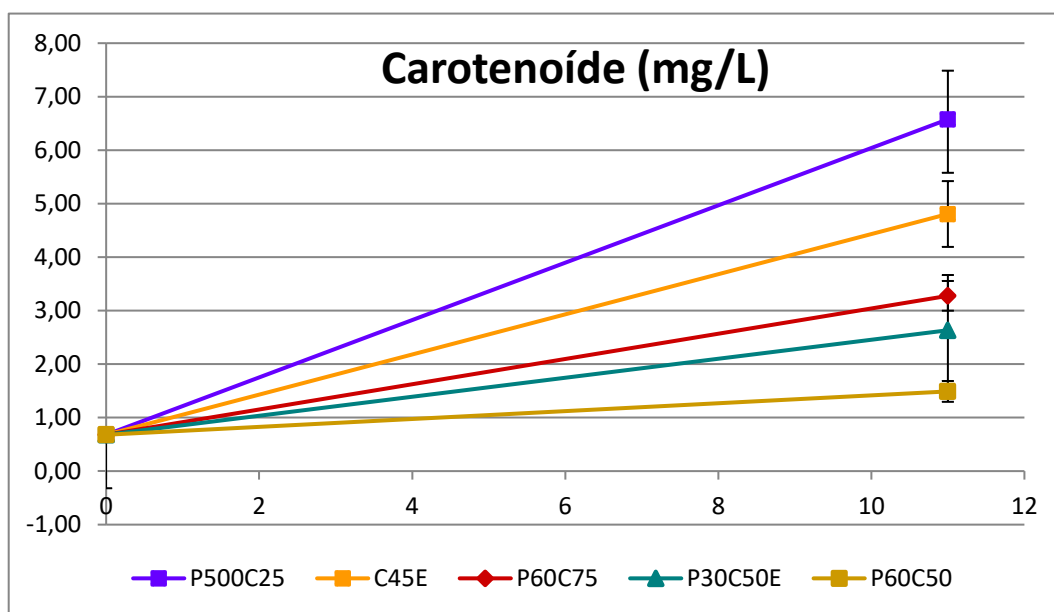


Figura 41 - Demonstração do pigmento carotenóide ao longo do ensaio E

## 5.4. Parametros de crescimento cinético dos ensaios C, D e E.

### 5.4.1. Taxa de crescimento do segundo grupo de ensaio C, D e E

As taxas de crescimento dos resultados do segundo grupo de ensaios C, D e E estão demonstradas na Figura 42, onde os valores máximos dos ensaios do segundo grupo foram:

A maior taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(1,573 \pm 0,078)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,177 \pm 0,736)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms), respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de  $(1,055 \pm 0,044)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A maior taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(0,882 \pm 0,0967)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de  $(0,860 \pm 0,494)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,858 \pm 0,555)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no P30C50E, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,782 \pm 0,474)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no P30C25, no terceiro dia

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms), respectivamente, e

ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,755 \pm 0,188)$  ( $d^{-1}$ ), no P500C50, no oitavo dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(0,693 \pm 0,000)$  ( $d^{-1}$ ), no P30C75, no terceiro dia.

As maiores taxas de crescimento no ensaio C, com ciclo de iluminação de 75% e fotoperíodo claro e escuro (0,375 ms e 0,125ms), (atingiu com intensidades luminosas de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), o valor de  $(0,600 \pm 0,047)$  ( $d^{-1}$ ), no P500C75, no quarto dia. Os demais reatores foram descartados.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,508 \pm 0,225)$  ( $d^{-1}$ ), no P30C50, no nono dia.

Uma vez que estamos a fazer um estudo de crescimento, que faz sentido verificar as taxas de crescimento onde houve aumento da biomassa, demonstrada na Figura 43

No início do ensaio houve a fase de Indução ou Fase de Lag onde houve a adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular.

Pode se perceber a fase exponencial ou fase Log, nesta fase, a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo. A Figura 42 demonstra a taxa de crescimento dos ensaios C, D e E.

A Tabela 70 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados dos ensaios C, D e E.

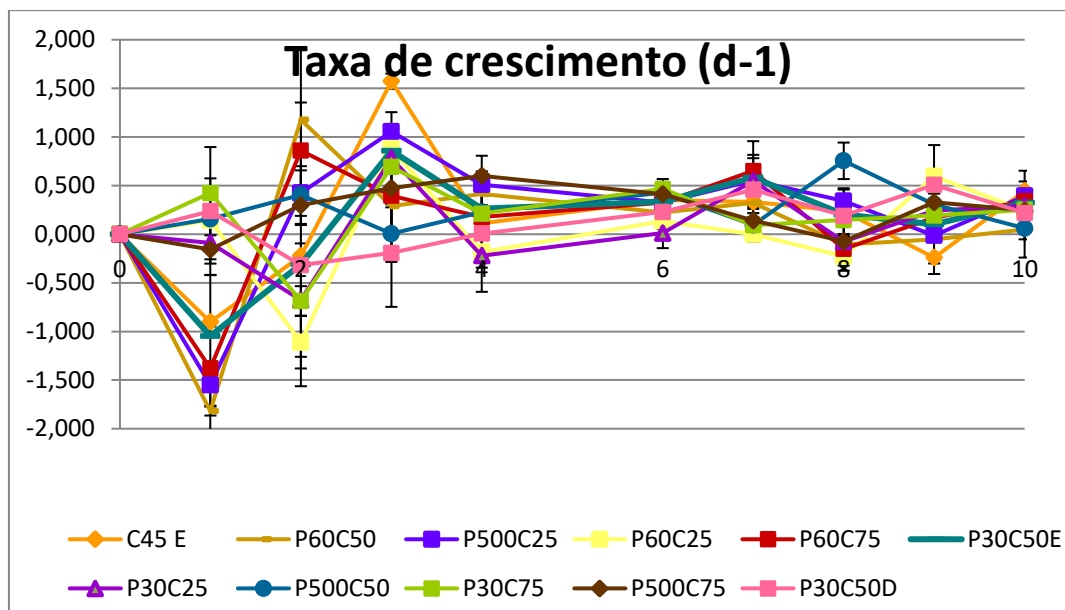


Figura 42 - Taxa de crescimento dos ensaios C, D e E

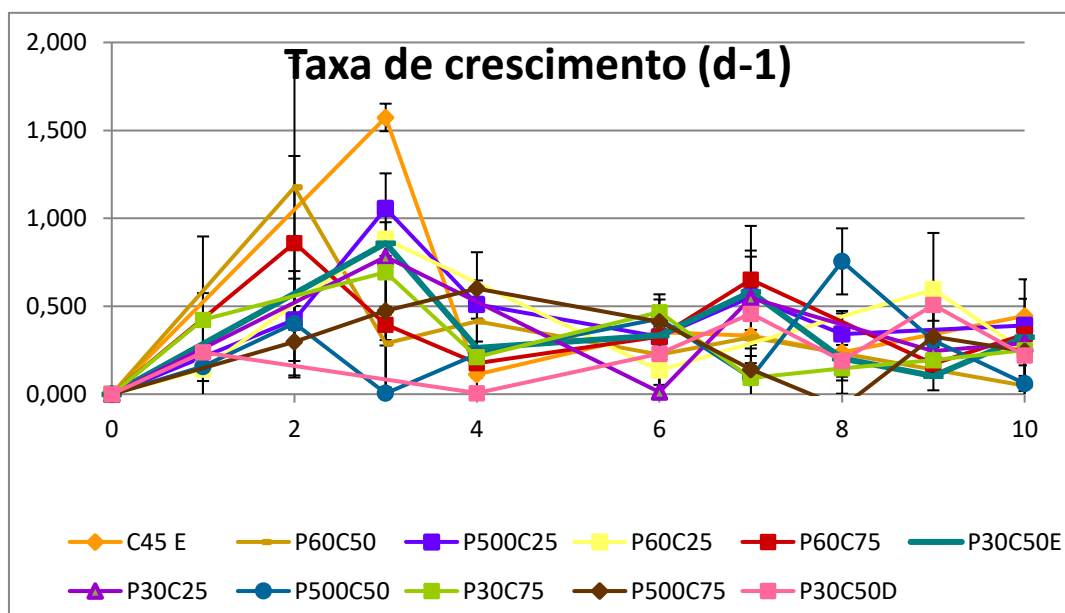


Figura 43 - Taxa de crescimento do ensaio C, D e E positiva

#### 5.4.2. Taxa de crescimento ciclo de iluminação de 75% e diferentes fotoperíodos

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 45 e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(0,860 \pm 0,494) (\text{d}^{-1})$ , no P60C75, no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(0,693 \pm 0,000) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P30C75, no terceiro dia.

As maiores taxas de crescimento no ensaio C, com ciclo de iluminação de 75% e fotoperíodo claro e escuro (0,375 ms e 0,125ms), (com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), atingiu o valor de  $(0,600 \pm 0,047) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P500C75, no quarto dia. Os demais reatores foram descartados. Estes ensaios receberam a mesma intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 75% com diferentes fotoperíodos. Eles receberam a mesma energia só que de maneiras diferentes.

O fotoperíodo com maior permanência no claro obteve as melhores taxas de crescimento. O período com maior exposição ao claro favorece melhores taxas.

A Figura 44 demonstra a taxa de crescimento dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 75%.

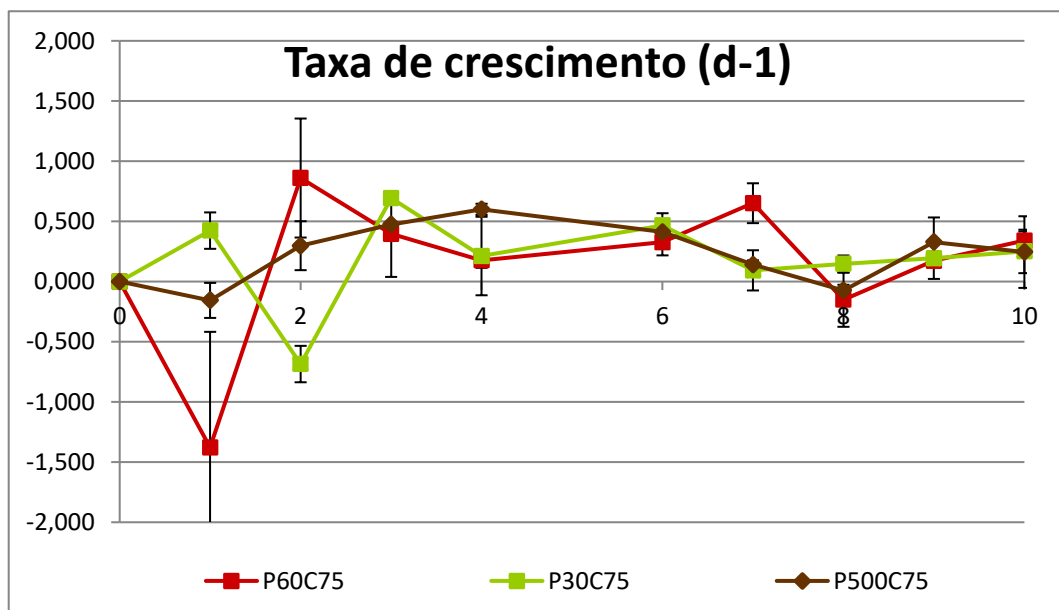


Figura 44 - Taxa de crescimento dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 75%

### **5.4.3. Taxa de crescimento com ciclo de iluminação de 50% e diferentes fotoperíodos**

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(1,177 \pm 0,736) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P60C50, no segundo dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,858 \pm 0,555) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P30C50E, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,755 \pm 0,188) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P500C50, no oitavo dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,508 \pm 0,225) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P30C50D, no nono dia. Estes ensaios receberam a mesma intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 50% com diferentes fotoperíodos. Eles receberam a mesma energia só que de maneiras diferentes.

O fotoperíodo com maior permanência no claro obteve as melhores taxas de crescimento. O período com maior exposição ao claro favorece melhores taxas.

Os ensaios P30C50E e P30C50D estão com os valores inconsistentes.

A Figura 45 demonstra a taxa de crescimento dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 50%.

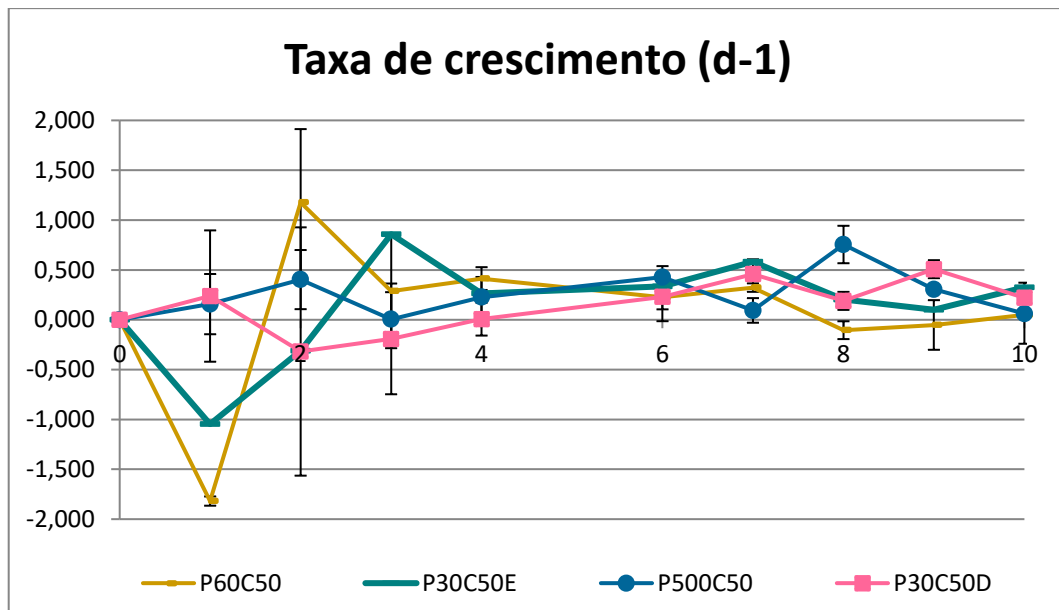


Figura 45 - Taxa de crescimento dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 50%

#### 5.4.4. Taxa de crescimento com ciclo de iluminação de 25% e diferentes fotoperíodos

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms), respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(1,055 \pm 0,044) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P500C25, no terceiro dia.

A maior taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,882 \pm 0,0967) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P60C25, no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min), respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,782 \pm 0,474) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no P30C25, no terceiro dia. Estes ensaios receberam a mesma intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 25% com diferentes fotoperíodos. Eles receberam a mesma energia só que de maneiras diferentes.

O fotoperíodo com maior permanência no claro obteve as melhores taxas de crescimento. O período com maior exposição ao claro favorece melhores taxas.

O ensaio P500C25 funcionou como uma luz intermitente, não o ciclo escuro devido a fração em milissegundos ser muito pequena.

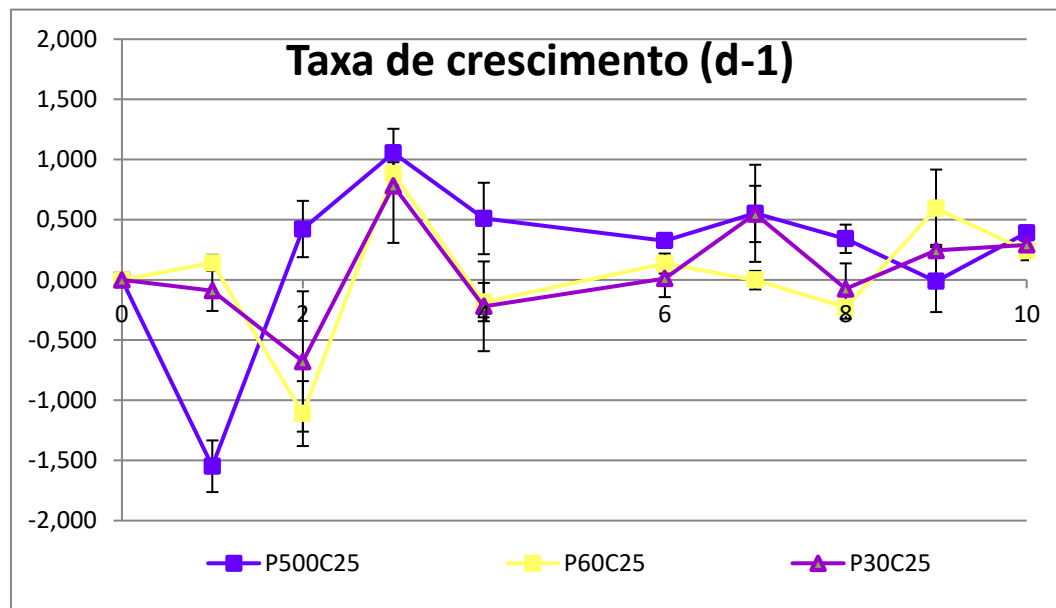


Figura 46 - Taxa de crescimento dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 25%

#### 5.4.5. Produtividade dos ensaios C, D e E

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro do mesmo tempo de cultivo, demonstrado na Equação 2.

A maior produtividade do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de  $(0,827 \pm 0,131) (\text{d}^{-1})$ , no oitavo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de  $(0,437 \pm 0,129) (\text{g/L d})$ , no décimo dia.

As maiores taxas de produtividade (g/L d) no ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,124 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 75% no P500C75  $(0,420 \pm 0,310) (\text{g/L d})$ , no nono dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(0,357 \pm 0,214) \text{ (g/L d)}$ , no décimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de  $(0,290 \pm 0,225)$ , no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 45 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de  $(0,227 \pm 0,038) \text{ (g/L d)}$ , no P60C75 no sétimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,200 \pm 0,089) \text{ (g/L d)}$  no P30C50D no nono dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 15 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de  $(0,175 \pm 0,073) \text{ (g/L d)}$ , no décimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(0,090 \pm 0,062) \text{ (g/L d)}$ , no nono dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 30 min e 30 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(0,078 \pm 0,013) \text{ (g/L d)}$ , no sétimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 7,5 min e 22,5 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,077 \pm 0,021) \text{ (g/L d)}$  no P30C25 no sétimo dia.

A Figura 47 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições dos resultados dos ensaios A e B do segundo grupo.

A Tabela 74 representa os resultados da média e o desvio padrão das produtividades dos resultados dos ensaios C, D e E.

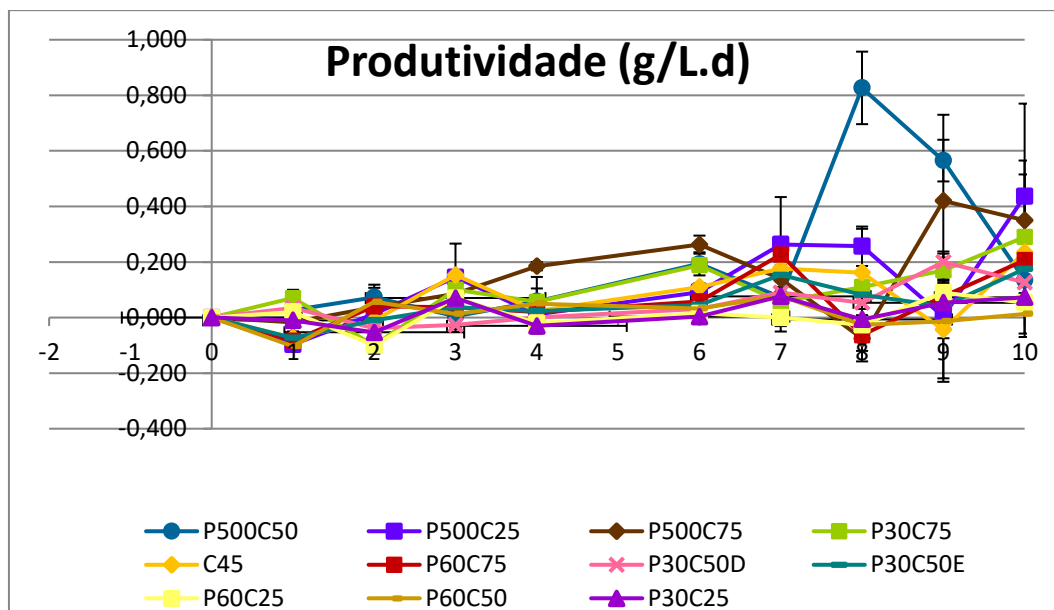


Figura 47 Taxa de produtividade do ensaio C, D e E.

### 1.1.1. Produtividade com ciclo de iluminação de 75% e diferentes fotoperíodos.

As maiores taxas de produtividade (g/L d) no ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,124 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 75% no P500C75 ( $0,420 \pm 0,310$ ) (g/L d), no nono dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 22,5 min e 7,5 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor de ( $0,290 \pm 0,225$ ) (g/L d), no P30C75 no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 45 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $0,227 \pm 0,038$ ) (no P30C75), no sétimo dia. As produtividades foram maiores onde o ciclo escuro foi menor. O período escuro interfere na produtividade.

O fotoperíodo com menor permanência no escuro obteve as melhores produtividades. O período com menor exposição ao escuro favorece melhores as melhores produtividades.

A Figura 48 demonstra a produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 75%.

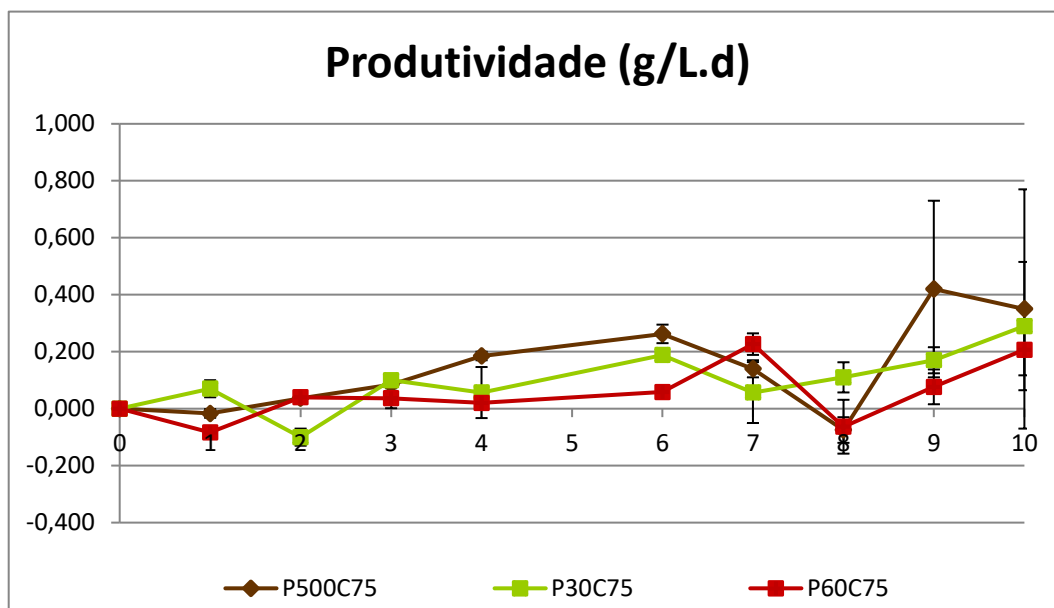


Figura 48 - Produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 75%

#### 5.4.6. Produtividade com ciclo de iluminação de 50% e diferentes fotoperíodos

A maior produtividade do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 0,250 ms e 0,250 ms, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,827 \pm 0,131)$  (g/L d), no P500C50, no oitavo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 15 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,200 \pm 0,089)$  (g/L d) no P30C50D, no nono dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 15 min e 15 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,175 \pm 0,073)$  (g/L d) no P30C50E, no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 30 min e 30 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,078 \pm 0,013)$  (g/L d) no P60C50, no sétimo dia.

As produtividades foram maiores onde o ciclo escuro foi menor. O período escuro interfere na produtividade. O fotoperíodo com menor permanência no escuro obteve as melhores produtividades. O período com menor exposição ao escuro favorece a produtividade.

A Figura 49 demonstra a produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 50%.

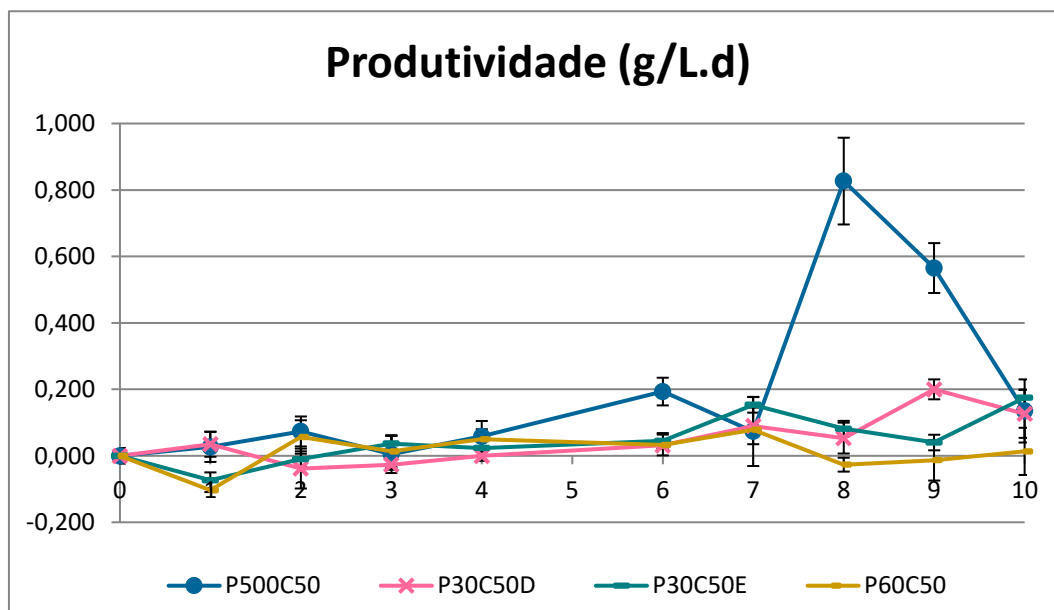


Figura 49 - Produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 50%

#### 5.4.7. Produtividade com ciclo de iluminação de 25% e diferentes fotoperíodos

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 0,125 ms e 0,375 ms, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,437 \pm 0,129) \text{ (g/L d)}$  no P500C25, no décimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 15 min e 45 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor de  $(0,090 \pm 0,062) \text{ (g/L d)}$  no P60C25, no nono dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de 7,5 min e 22,5 min, respectivamente, e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de  $(0,077 \pm 0,021) \text{ (g/L d)}$ , no sétimo dia. As produtividades foram maiores onde o ciclo escuro foi menor. O período escuro

interfere na produtividade. O fotoperíodo com menor permanência no escuro obteve as melhores produtividades. O período com menor exposição ao escuro favorece a produtividade.

O ensaio E funcionou com luz intermitente.

Os ensaios D devido a longa exposição escura produziu baixa produtividade, ocorreu fotoinibição.

A Figura 50 demonstra a produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 25%.

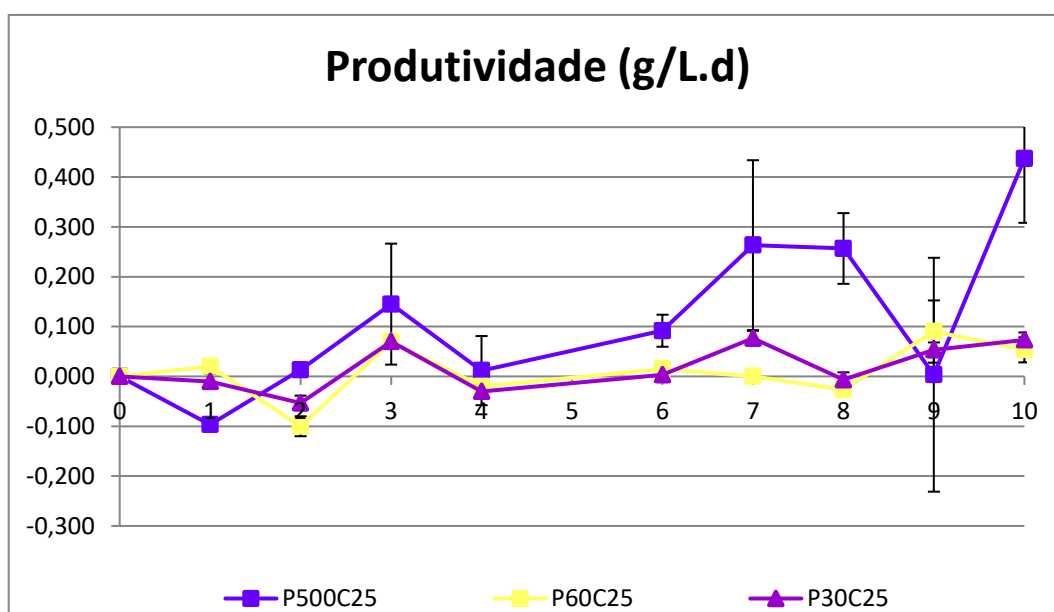


Figura 50 - Produtividade dos ensaios C, D e E com ciclo de iluminação de 25%

#### 5.4.8. Evolução do consumodiário de nitrato dos ensaios C, D e E

A evolução do consumo específico diário de nitrato (ECN), (mg/L d) foi determinado de acordo com a Equação 3.

Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A evolução do consumo de nitrato foi demonstrada na Figura 51.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $155,667 \pm 26,102$ ) (mg/L d), no quarto dia.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 22,5 min e 7,5 min, respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $154,667 \pm 20,429$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no nono dia.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $153,333 \pm 24,007$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no nono dia.

A evolução do consumo diário C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de 0,375 ms e 0,125 ms, respectivamente, e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P500C75 de ( $147,000 \pm 62,746$ ) (mg/L d), no sétimo dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $128,333 \pm 25,325$ ) (mg/L d), no décimo dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $127,333 \pm 17,039$ ) (mg/L d), no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $122,167 \pm 35,286$ ) (mg/L d), no quarto dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de

iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(121,333 \pm 35,005)$  (mg/L d), no quarto dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de  $(64,333 \pm 33,650)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no nono dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(56,333 \pm 79,034)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no quarto dia.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de  $(38,333 \pm 9,238)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no sétimo dia.

A Figura 51 representa a evolução diária dos ensaios do segundo grupo C, D e E.

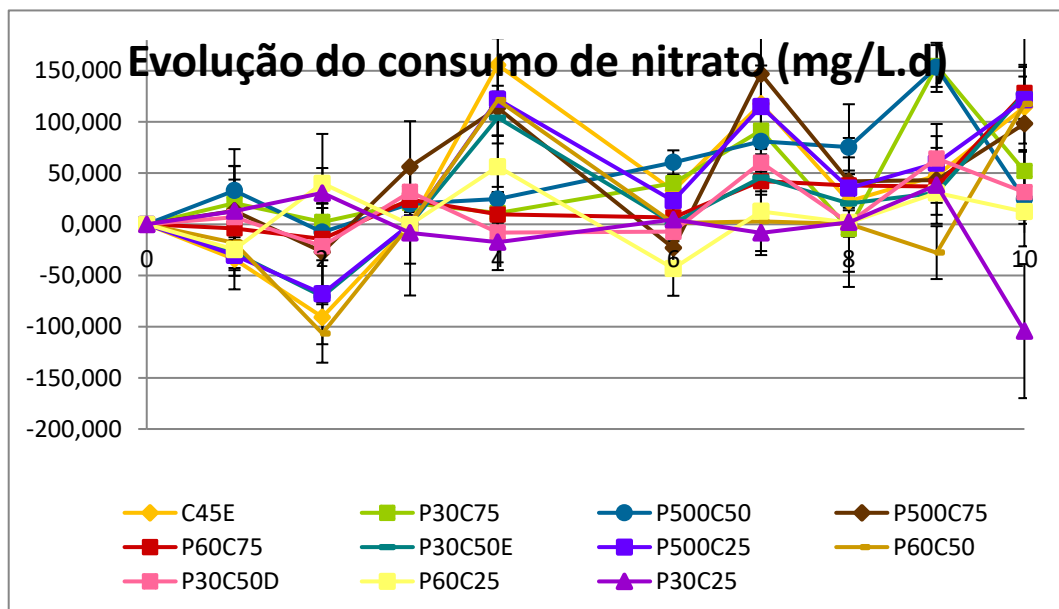


Figura 51 - Evolução do consumo diário de nitrato dos ensaios C, D e E

A taxa de crescimento positiva, onde houve aumento da biomassa, encontra-se demonstrada na Figura 52.

A Tabela 72 representa os resultados da média e o desvio padrão da evolução do consumo específico de nitrato dos resultados dos ensaios C, D e E.

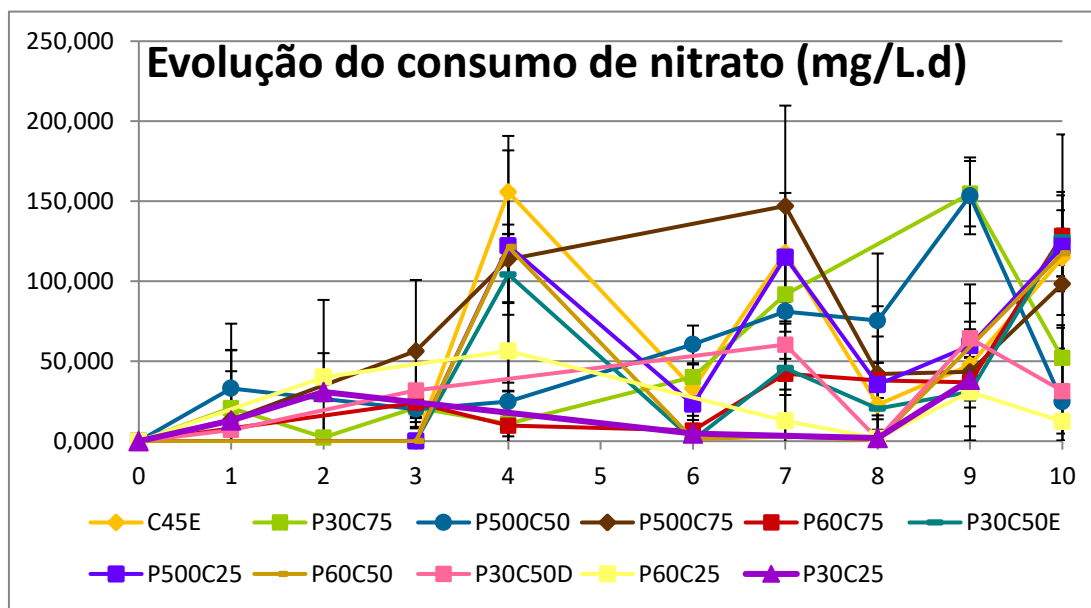


Figura 52 - Evolução do consumo diário de nitrato positivo

#### 5.4.9. Pigmentos do segundo grupo de ensaios C, D e E

A concentração do pigmento clorofila do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), no P500C75 ( $147 \pm 21,485$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $38,667 \pm 1,570$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $31,060 \pm 2,231$ ), (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $25,663 \pm 4,178$ ) ( $\text{mgL}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(17,897 \pm 2,903)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de  $(11,830 \pm 0,871)$  ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de  $(11,227 \pm 1,233)$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de  $(8,800 \pm 4,286)$  ( $\text{mg. L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de  $(5,583 \pm 2,005)$  ( $\text{mg./L.}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(4,410 \pm 1,022)$  ( $\text{mg. L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(3,947 \pm 0,023)$  ( $\text{mg/L}$ ), no décimo dia.

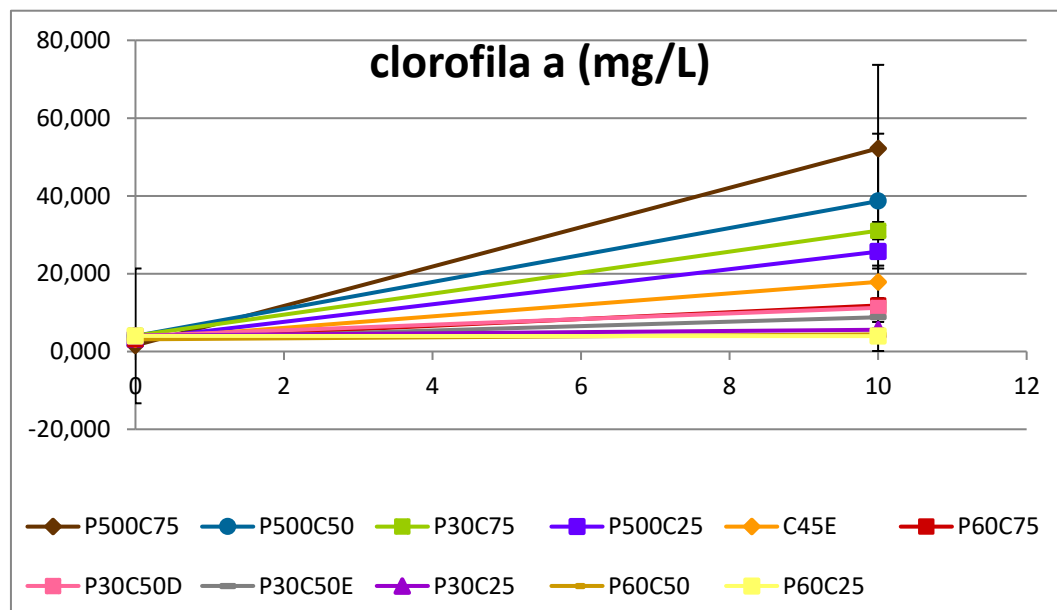
A

Tabela 112 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*a* dos ensaios C, D e E.

A Tabela 113 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*b* dos ensaios C, D e E.

A Tabela 114 demonstra o resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios C, D e E.

A Figura 53 demonstra A concentração do pigmento clorofila-*a* dos ensaios C, D e E.



**Figura 53 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-*a* ao longo do ensaio C, D e E**

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de (20,671  $\pm$  8,719) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de (18,077  $\pm$  1,317) (mg. /L.), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $13,790 \pm 1,139$ ), (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $9,900 \pm 1,562$ ) (mg L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $6,803 \pm 1,206$ ) (mg L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $3,987 \pm 0,590$ ) (mg.L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $3,947 \pm 1,233$ ) (mg L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $2,7880 \pm 1,753$ ) (mg. L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

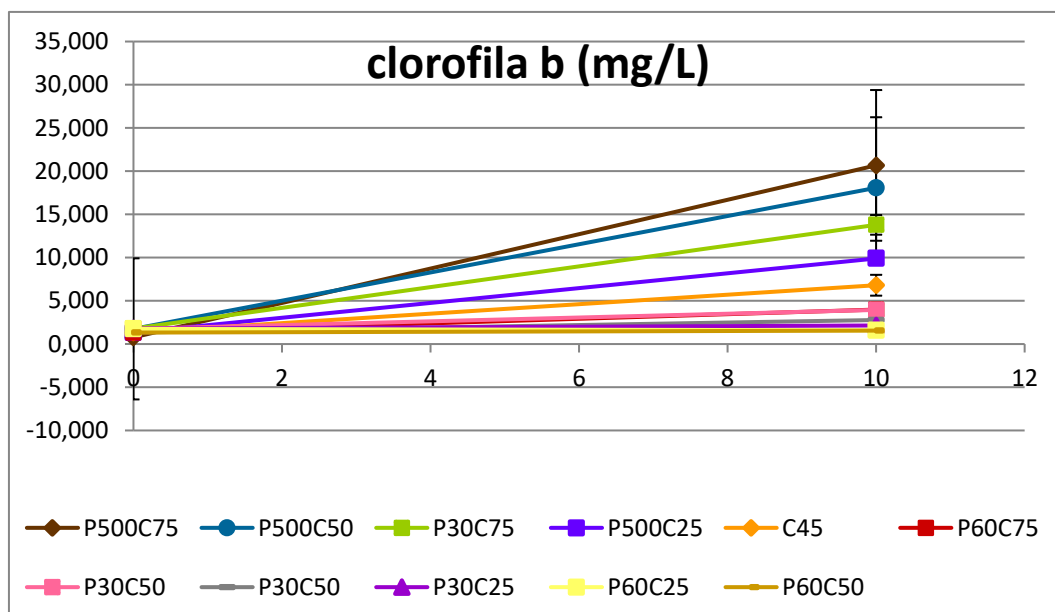
A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $2,147 \pm 0,582$ ) (mg./L d.), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min)

respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(1,590 \pm 0,017)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,553 \pm 0,510)$  (mg. L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A Figura 54 demonstra A concentração do pigmento clorofila-*b* ao longo dos ensaios C, D e E.



**Figura 54 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-*b* ao longo do ensaio C, D e E**

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de  $(13,050 \pm 4,876)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de  $(9,713 \pm 0,153)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $7,647 \pm 0,474$ ), ( $\text{mg/L}$ ) no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $6,577 \pm 0,909$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $4,807 \pm 0,615$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $3,343 \pm 0,264$ ) ( $\text{mg L}^{-1}$ ) no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $3,277 \pm 0,278$ ) ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), no décimo dia.

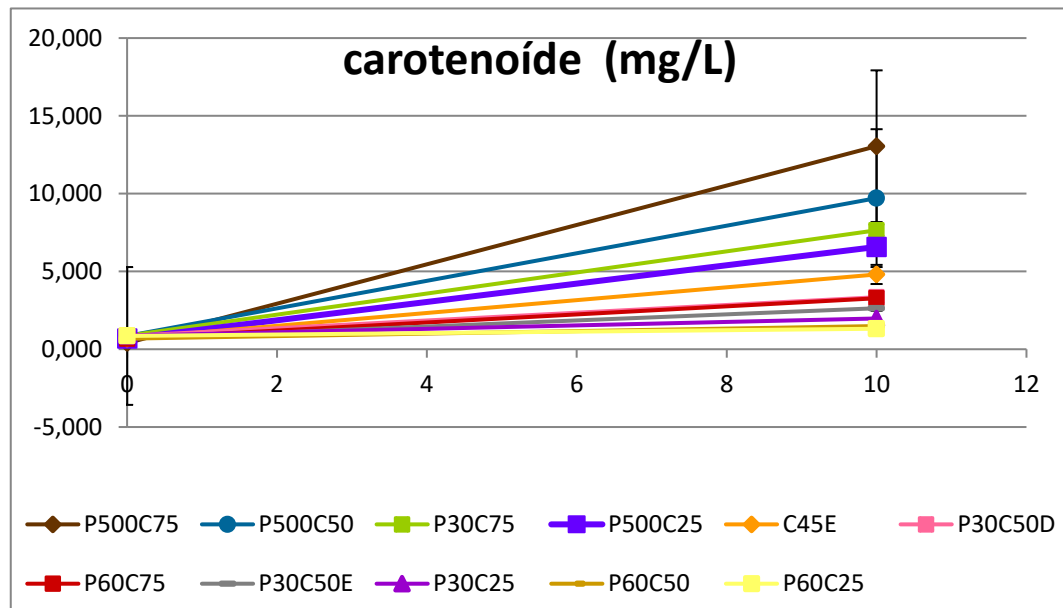
A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $2,633 \pm 1,033$ ) ( $\text{mg. L}^{-1}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $1,977 \pm 0,497$ ) ( $\text{mg./L.d.}$ ), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min)

respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(1,317 \pm 0,046)$  (mg/L), no décimo dia

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 (\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,490 \pm 0,195)$  (mg L<sup>-1</sup>), no décimo dia.



**Figura 55 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenóide ao longo do ensaio C, D e E**

## 6. Resultados e discussões do primeiro e segundo experimento dos grupos A, B, C, D e E

### 6.1. Parametros de Crescimento cinetico do ensaio A, B, C, D e E

#### 6.1.1. Taxa de crescimento do primeiro e segundo grupo de ensaio.

A maior taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(1,573 \pm 0,078)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,177 \pm 0,736)$  ( $\text{d}^{-1}$ ), no segundo dia. Comprova que a intensidade luminosa é favoravel para o crescimento da microalga.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e

ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de  $(1,055 \pm 0,044)$  ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. Este fotoperíodo cuja frequência escura é muito pequena não afetou o crescimento da micralga. O fotoperíodo escuro muito pequeno (ms), não funcionou como um fotonibidor para o crescimento microalgal.

A taxa de crescimento do ensaio C150 com intensidade luminosa de  $150$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(0,894 \pm 0,340)$ , ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. A intensidade luminosa favoreceu o crescimento microalgal.

A maior taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(0,882 \pm 0,0967)$  ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. A frequência de 25% claro e 75% escuro para um ciclo de 60 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de  $(0,860 \pm 0,494)$  ( $d^{-1}$ ), no segundo dia. A frequência de 75% claro e 25% escuro para um ciclo de 60 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento no ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de  $(0,858 \pm 0,555)$  ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. A frequência de 50% claro e 50% escuro para um ciclo de 30 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento do ensaio C113 com intensidade luminosa de  $112,5$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(0,796 \pm 0,200)$ , ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45$  ( $\mu E m^{-2} s^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C25 de  $(0,782 \pm 0,474)$  ( $d^{-1}$ ), no terceiro dia. A frequência de 25% claro e 75% escuro para um ciclo de 30 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $0,755 \pm 0,188$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no oitavo dia A frequência de 50% claro e 50% escuro para um ciclo de 0,50 ms, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $0,693 \pm 0,000$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia A frequência de 75% claro e 25% escuro para um ciclo de 30 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

A taxa de crescimento do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de ( $0,663 \pm 0,318$ ), ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento do ensaio C30B com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de ( $0,631 \pm 0,450$ ), ( $\text{d}^{-1}$ ), no segundo dia.

A taxa de crescimento do ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $0,621 \pm 0,333$ ), ( $\text{d}^{-1}$ ), no segundo dia.

A taxa de crescimento do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $0,618 \pm 0,022$ ), ( $\text{d}^{-1}$ ), no quarto dia.

As maiores taxas de crescimento no ensaio C, com ciclo de iluminação de 75% e fotoperíodo claro e escuro (0,375 ms e 0,125 ms), (atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), o valor de ( $0,600 \pm 0,047$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no P500C75 no segundo dia. Os demais reatores foram descartados.

A taxa de crescimento do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de ( $0,558 \pm 0,203$ ), ( $\text{d}^{-1}$ ), no terceiro dia.

A taxa de crescimento no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $0,508 \pm 0,225$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no nono

dia. A frequência de 50% claro e 50% escuro para um ciclo de 30 minutos, não afetou a taxa de crescimento microalgal.

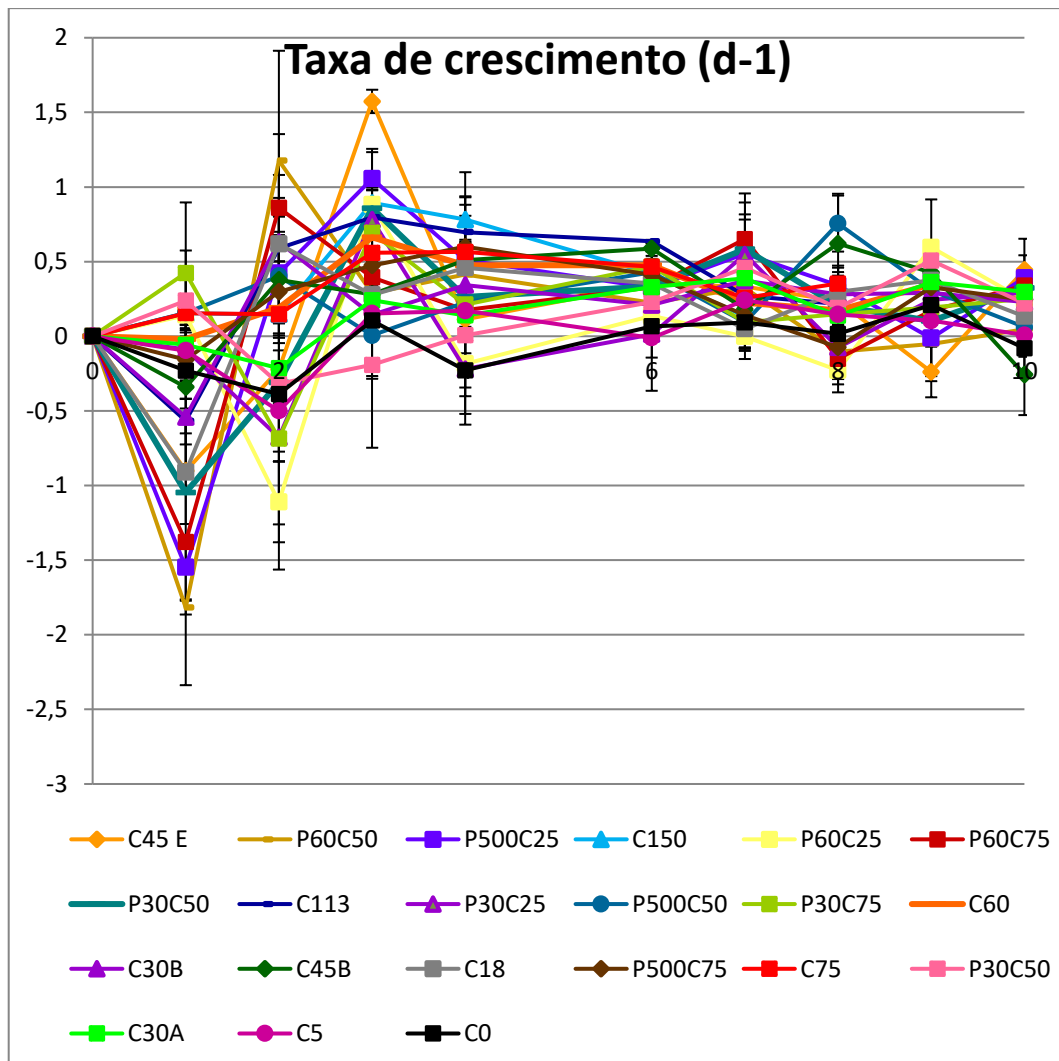
A taxa de crescimento do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(0,388 \pm 0,064)$ , ( $\text{d}^{-1}$ ), no sétimo dia. As intensidades luminosas menores afetaram o crescimento microalgal.

A taxa de crescimento do ensaio C5 com intensidade luminosa de 05 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(0,242 \pm 0,200)$ , ( $\text{d}^{-1}$ ), no sétimo dia. As intensidades luminosas menores afetaram o crescimento microalgal.

A taxa de crescimento do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% escuro atingiu o maior valor de  $(0,209 \pm 0,183)$ , ( $\text{d}^{-1}$ ), no nono dia. As intensidades luminosas menores afetaram o crescimento microalgal.

A Tabela 76 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos ensaios A, B, C, D e E.

A Figura 56 demonstra a média e o desvio padrão das taxas de crescimento reatores em triplicado sobre a mesma condição do primeiro e segundo grupo de ensaio A, B, C, D e E.



**Figura 56 - Taxa de crescimento de todos os ensaios**

No início do ensaio até o segundo dia houve a fase de Indução ou Fase de Lag, onde houve a adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular.

Pode se perceber a fase exponencial ou Fase Log, nesta: fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo, e consequentemente a fase de diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado. Esta fase deve-se a diminuição de nutrientes que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, consequentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial.

Na fase estacionária, não há variação da densidade celular, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular.

As taxas de crescimento positivas, onde houve aumento da biomassa, encontram-se demonstradas na Figura 57.

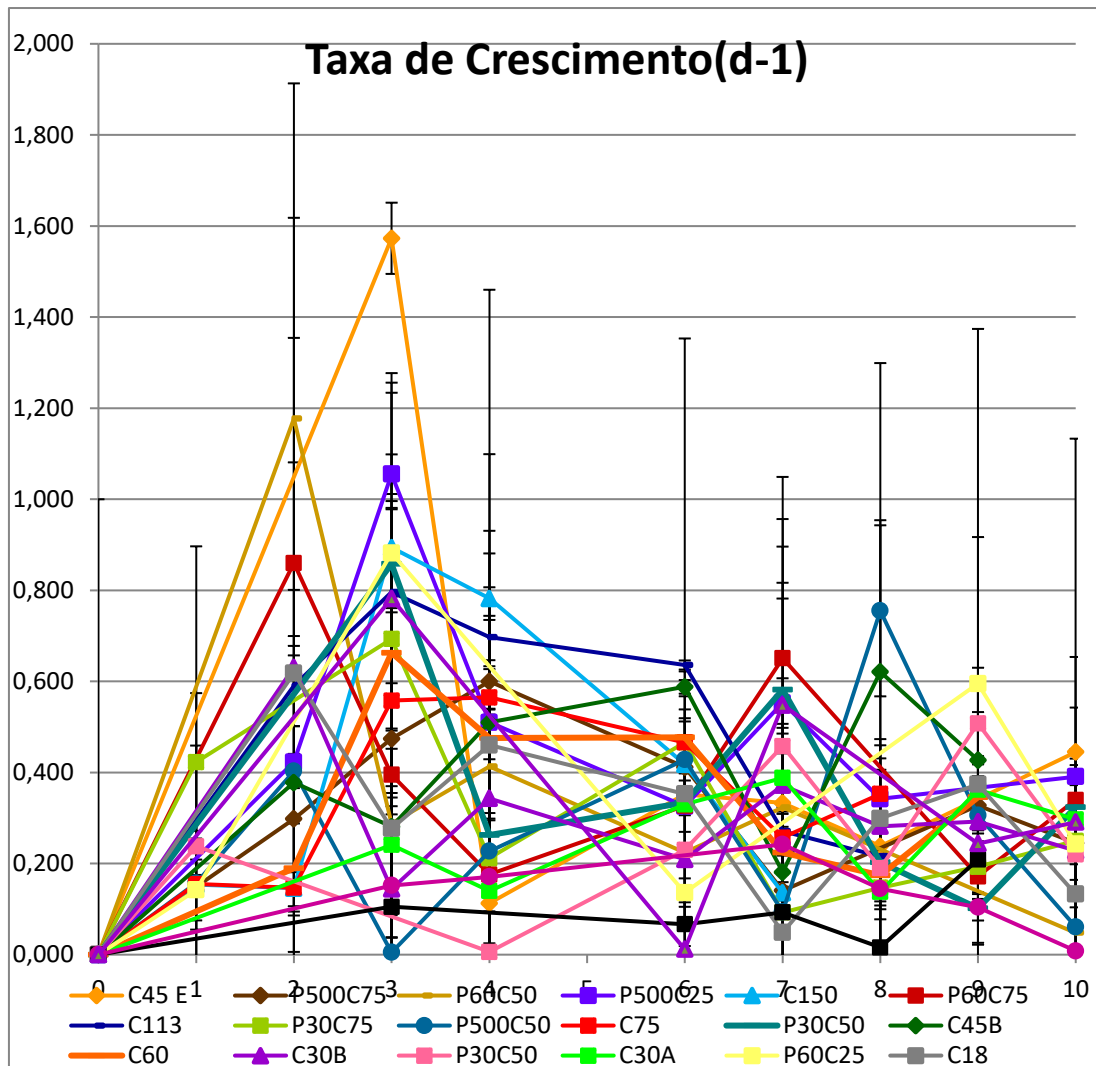


Figura 57 - Ttaxa de crescimento do primeiro e segundo grupo de ensaio A, B, C, De E positiva

### 6.1.2. Produtividade do primeiro grupo de ensaio A, B, C, D e E.

As produtividades de biomassa (P) foram calculadas a partir da mudança na concentração da biomassa diária dentro do mesmo tempo de cultivo, demonstrado na Equação 2.

A produtividade do ensaio C45B com intensidade luminosa de  $45 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor,  $(1,114 \pm 0,573) \text{ (g/L d)}$ , no nono dia do ensaio B.

A maior produtividade do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $0,827 \pm 0,131$ ) (g/L d.), no oitavo dia.

A produtividade do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $0,736 \pm 0,142$ ) (g/L d) , no sexto dia do ensaio B.

A produtividade do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $0,689 \pm 0,038$ ) (g/L d), no oitavo dia do ensaio A.

A produtividade do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $0,563 \pm 0,109$ ) (g/L d), no sexto dia do ensaio A.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $0,437 \pm 0,129$ ) (g/L d), no décimo dia.

As maiores taxas de produtividade (g /L d) no ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), no P500C75 ( $0,420 \pm 0,310$ ) (g/L d), no nono dia.

A produtividade do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor ( $0,401 \pm 0,211$ ) (g/L d) , no sexto dia do ensaio B.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $0,357 \pm 0,214$ ) (g/L d), no décimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $0,290 \pm 0,225$ ) (g/L d) no décimo dia.

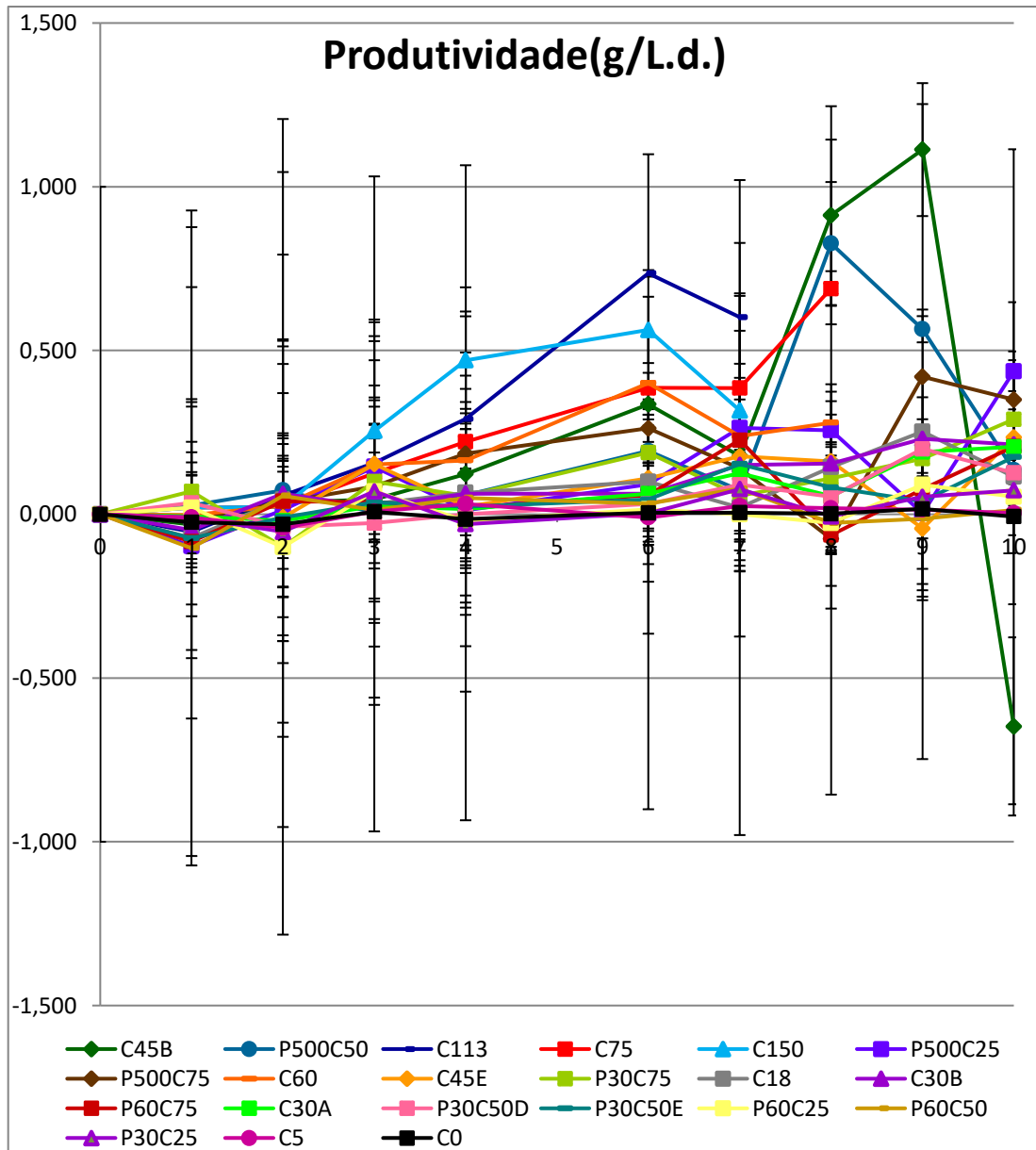
A produtividade do ensaio C18 com intensidade luminosa de  $17,5 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor,  $(0,253 \pm 0,012) \text{ (g/L d)}$ , no nono dia do ensaio B. A produtividade do ensaio C30B com intensidade luminosa de  $30 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(0,230 \pm 0,126) \text{ (g/L d)}$ , no nono dia do ensaio B. A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de  $(0,227 \pm 0,038) \text{ (g/L d)}$ , no sétimo dia. A produtividade do ensaio C30A com intensidade luminosa de  $30 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(0,206 \pm 0,016) \text{ (g/L-1d-1)}$ , no décimo dia do ensaio A.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de  $(0,200 \pm 0,089) \text{ (g L}^{-1}\text{d}^{-1})$  no nono dia. A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor de  $(0,175 \pm 0,073) \text{ (g/L d)}$ , no P30C50E no décimo dia. A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(0,090 \pm 0,062) \text{ (g /L d.)}$ , no nono dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(0,078 \pm 0,013) \text{ (g/L d)}$ , no sétimo dia.

A produtividade no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de  $(0,077 \pm 0,021) \text{ (g/L d)}$ , no sétimo dia. A produtividade do ensaio C5 com intensidade luminosa de  $5 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $0,031 \pm 0,073 \text{ g/L d}$ , no quarto dia do ensaio A. A produtividade do ensaio C0 com intensidade luminosa de  $0 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor,  $(0,016 \pm 0,014) \text{ (g/L d)}$ , no nono dia do ensaio A.

A Tabela 77 representa os resultados da média e o desvio padrão da produtividade dos ensaios A, B, C, D e E. A Figura 58 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro e segundo grupo de ensaio A, B, C, D e E.



**Figura 58 - Média e desvio padrão da produtividade nos reatores em triplicado dos ensaios A, B, C, D e E**

As taxas de produtividades positivas, onde houve aumento da concentração da biomassa, encontram-se demonstradas na Figura 59.

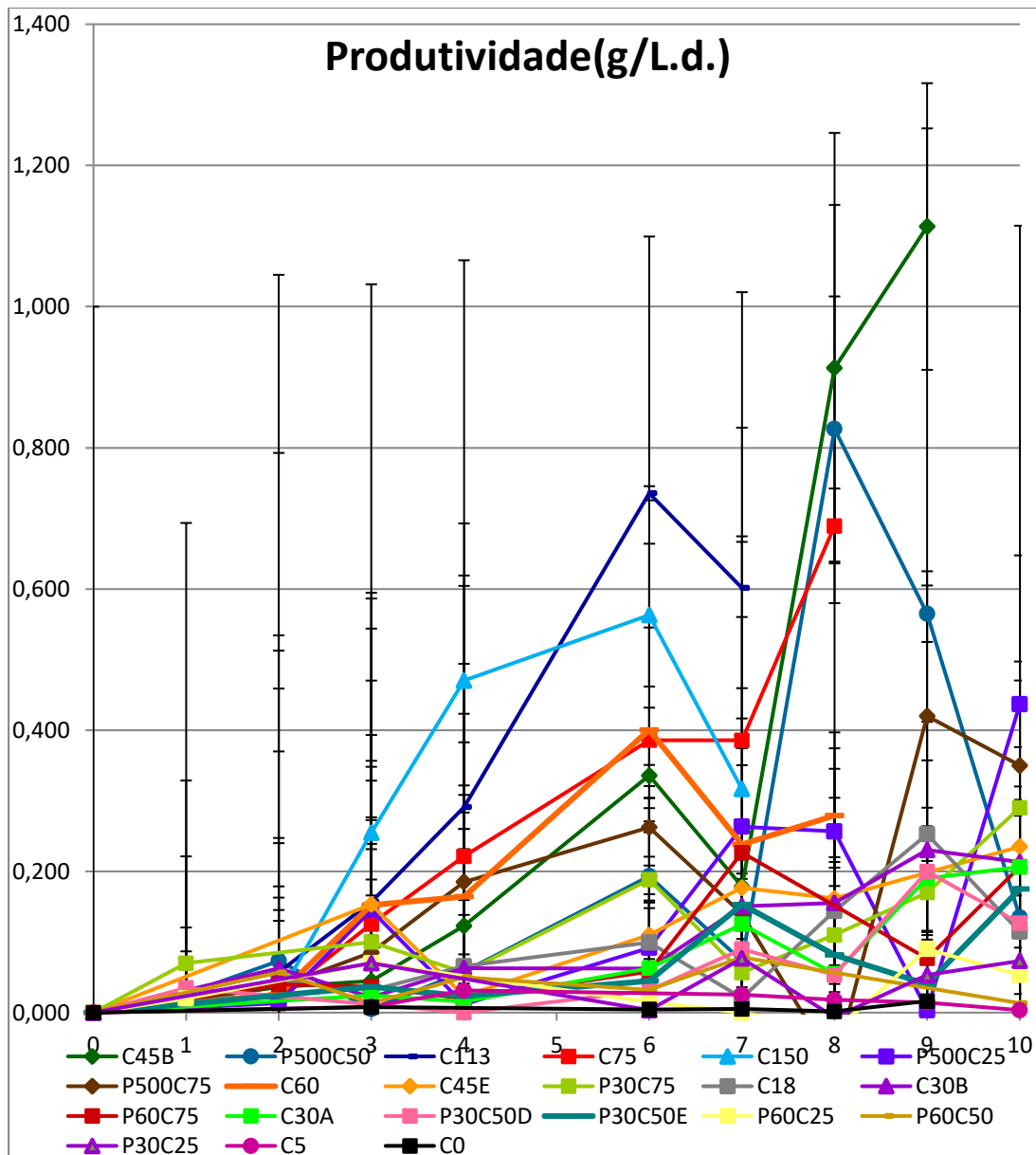


Figura 59 - Produtividade positiva dos ensaios A, B, C, D e E

### 6.1.3. Evolução do consumo diário de nitrato dos ensaios A, B, C, D e E

A evolução do consumo específico de nitrato diário (ECN), (mg /L.d) foi determinado de acordo com a Equação 3. Resulta na diferença da concentração diária de nitrato consumido no mesmo intervalo de tempo do consumo.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $158,894 \pm 23,373$ ) (mg /L d), no quarto dia do ensaio A.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $157,477 \pm 19,549$ ) (mg/L d), no sexto dia do ensaio B.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $155,667 \pm 26,102$ ) (mg/L d), no quarto diado ensaio E.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $154,667 \pm 20,429$ ) (mg/L d), no nono dia.

A maior evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $153,333 \pm 24,007$ ) (mg/L d), no nono dia.

A evolução do consumo diário C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P500C75 de ( $147,000 \pm 62,746$ ) (mg/L d), no sétimo dia.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $140,521 \pm 37,992$ ) (mg/L d), no sétimo dia do ensaio A.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $128,333 \pm 25,325$ ) (mg/L d), no décimo dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $127,333 \pm 17,039$ ) (mg/L d), no décimo dia.

A produtividade do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de  $(122,167 \pm 35,286) \text{ (mg/L d)}$ , no quarto dia.

A evolução do consumo diário E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(121,333 \pm 35,005) \text{ (mg/L d)}$ , no quarto dia.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio 45B com intensidade luminosa de  $45 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(113,721 \pm 23,256) \text{ (mg/L d)}$ , no sétimo dia do ensaio B.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C60 com intensidade luminosa de  $60 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(87,188 \pm 4,423) \text{ (mg/L d)}$ , no sétimo dia do ensaio B.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C30B com intensidade luminosa de  $30 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor  $(70,969 \pm 8,154) \text{ (mg/L d)}$ , no segundo dia do ensaio B.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de  $(64,333 \pm 33,650) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no nono dia.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C30A com intensidade luminosa de  $30 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(58,182 \pm 30,673) \text{ (mg/L d)}$ , no décimo dia do ensaio A.

A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ (}\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(56,333 \pm 79,034) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ , no quarto dia.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $51,178 \pm 3,087$ ) ( $\text{mg/L d}$ ), no nono dia do ensaio B. A evolução do consumo de nitrato do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de ( $41,679 \pm 33,476$ ) ( $\text{mg/L d}$ ) no oitavo dia do ensaio A. A evolução do consumo de nitrato do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de ( $40,319 \pm 18,883$ ) ( $\text{mg/L d}$ ) no oitavo dia do ensaio A. A evolução do consumo de nitrato no ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $38,333 \pm 9,238$ ) ( $\text{d}^{-1}$ ), no sétimo dia. A Tabela 78 representa os resultados da média e o desvio padrão do consumo específico de nitrato dos ensaios A, B, C, D e E. A Figura 60 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário de nitrato, nos reatores em triplicado sobre as mesmas condições do primeiro e segundo grupo de ensaio A, B, C, D e E.

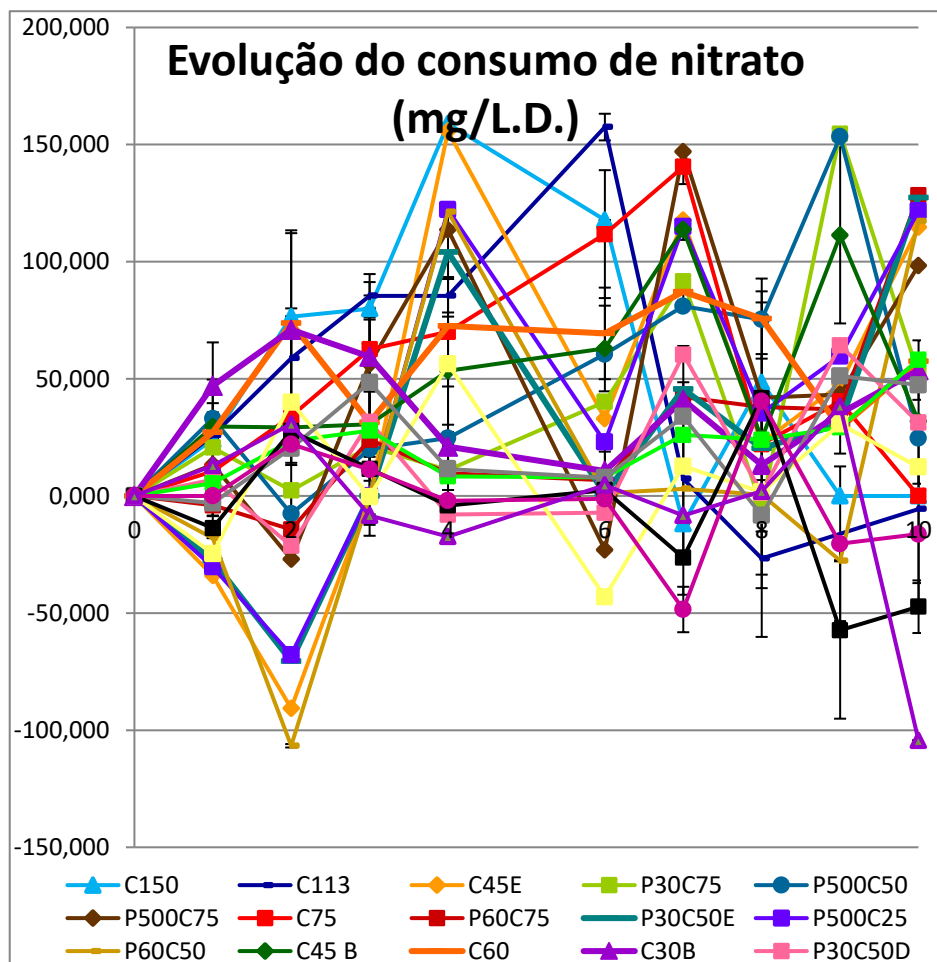


Figura 60 - Evolução do consumo de nitrato dos ensaios A, B, C, D e E

A Figura 61 demonstra a evolução do consumo de nitrato.

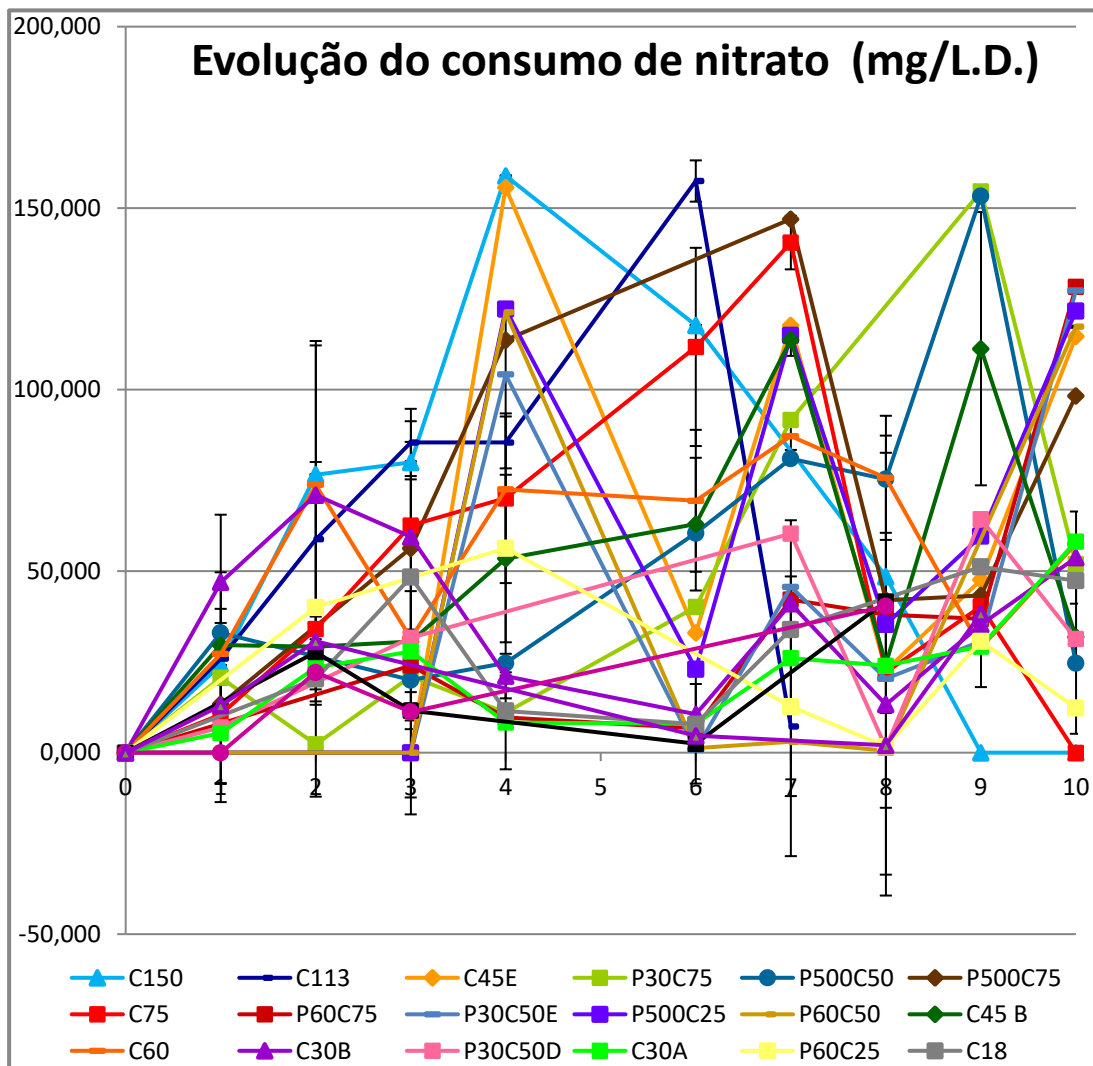


Figura 61 - Evolução do consumo de nitrato positivo dos ensaios A, B, C, D e E

#### 6.1.4. Pigmentos

A concentração do pigmento clorofila-*a* C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $67,967 \pm 14,365$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $60,333 \pm 2,581$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms)

respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de  $(52,207 \pm 21,485)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(46,667 \pm 6,332)$  (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(40,767 \pm 7,922)$  (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50D de  $(38,667 \pm 1,570)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(34,600 \pm 5,761)$  (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de  $(31,060 \pm 2,231)$  (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(27,100 \pm 4,557)$  (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de  $(25,663 \pm 4,178)$  (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor,  $(23,067 \pm 6,658)$  (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $22,067 \pm 5,564$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $17,897 \pm 2,903$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), no P500C75 ( $13,050 \pm 4,876$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $11,830 \pm 0,871$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $11,227 \pm 1,233$ ) (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $8,800 \pm 4,286$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $5,583 \pm 2,005$ ) (mg/L d.), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de ( $4,410 \pm 1,022$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(3,947 \pm 0,023)$  (mg/L), no décimo dia

A concentração do pigmento clorofila do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor  $(1,400 \pm 0,100)$ , (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*a* do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor,  $(0,0833 \pm 0,306)$  (mg/L d), no décimo dia do ensaio B.

A Tabela 115 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*a* dos ensaios A, B, C, D e E.

#### A

**Tabela 116 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*b* dos ensaios A, B, C, D e E. A**

Tabela 117 demonstra o resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios A, B, C, D e E.

A Figura 62 demonstra a concentração do pigmento clorofila-*a* de todos os ensaios do primeiro e segundo grupo de ensaio. Figura 63 demonstra A concentração do pigmento clorofila-*b* de todos os ensaios do primeiro e segundo grupo de ensaio. A Figura 64 demonstra A concentração do pigmento carotenóide de todos os ensaios do primeiro e segundo grupo de ensaio.

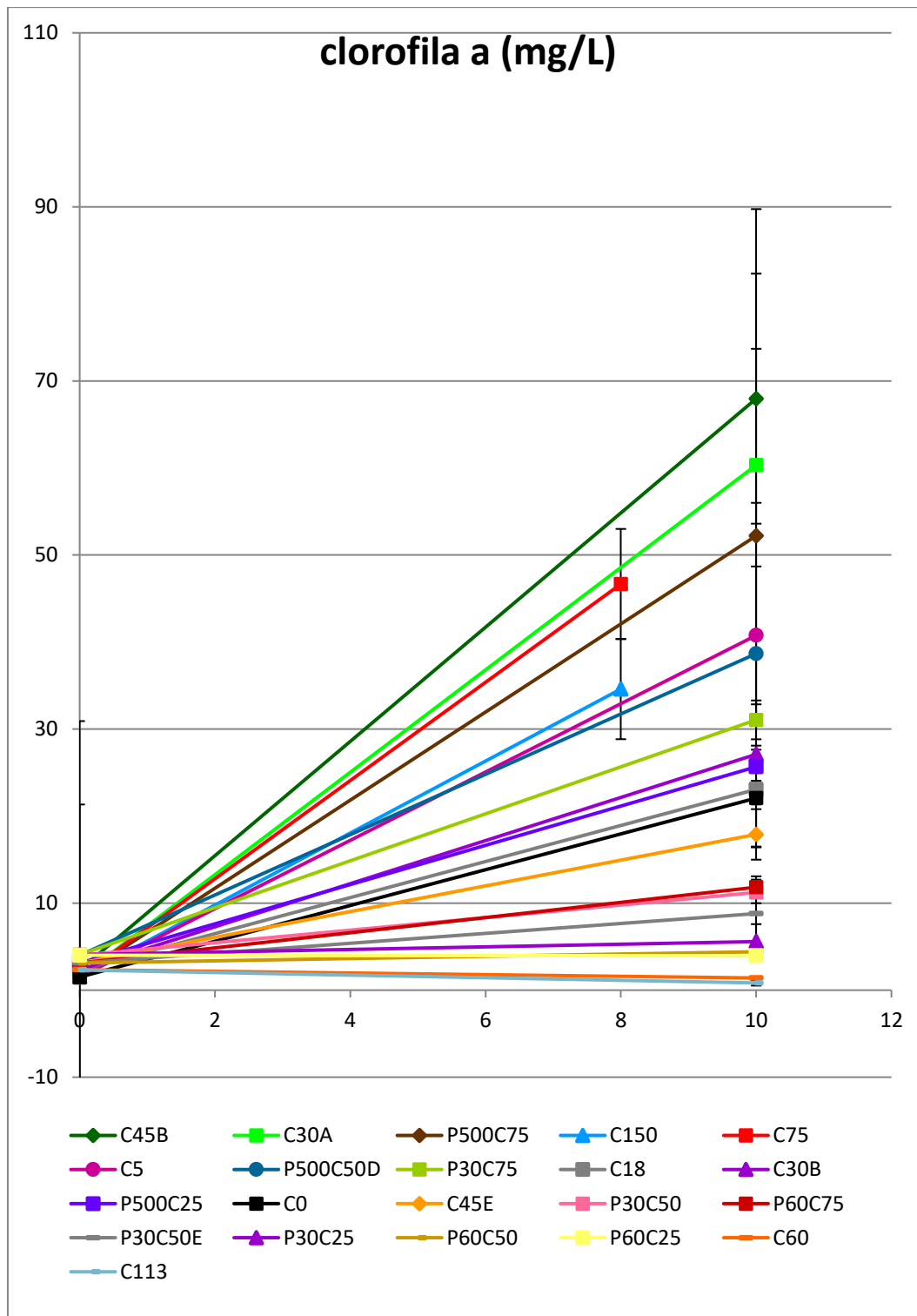


Figura 62 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila-a ao longo do ensaio A, B, C, D, e E

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $24,767 \pm 0,666$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $24,533 \pm 6,803$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $20,767 \pm 3,272$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de ( $20,671 \pm 8,719$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $18,333 \pm 2,325$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $18,077 \pm 1,317$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $13,790 \pm 1,139$ ) (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $13,600 \pm 2,571$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $11,567 \pm 3,044$ ) (mg/L d), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $9,900 \pm 1,562$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $9,033 \pm 1,779$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $6,803 \pm 1,206$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $4,233 \pm 9,471$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $3,987 \pm 0,590$ ) (mg.L<sup>-1</sup>), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $3,947 \pm 1,233$ ) (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $2,7880 \pm 1,753$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio C60 com intensidade luminosa de 60 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $2,667 \pm 0,379$ ), (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de ( $2,147 \pm 0,582$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de ( $1,590 \pm 0,017$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofila-*b* do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de ( $1,553 \pm 0,510$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento clorofilaba do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor , ( $1,367 \pm 0,513$ ) (mg/L d), no décimo dia do ensaio B.

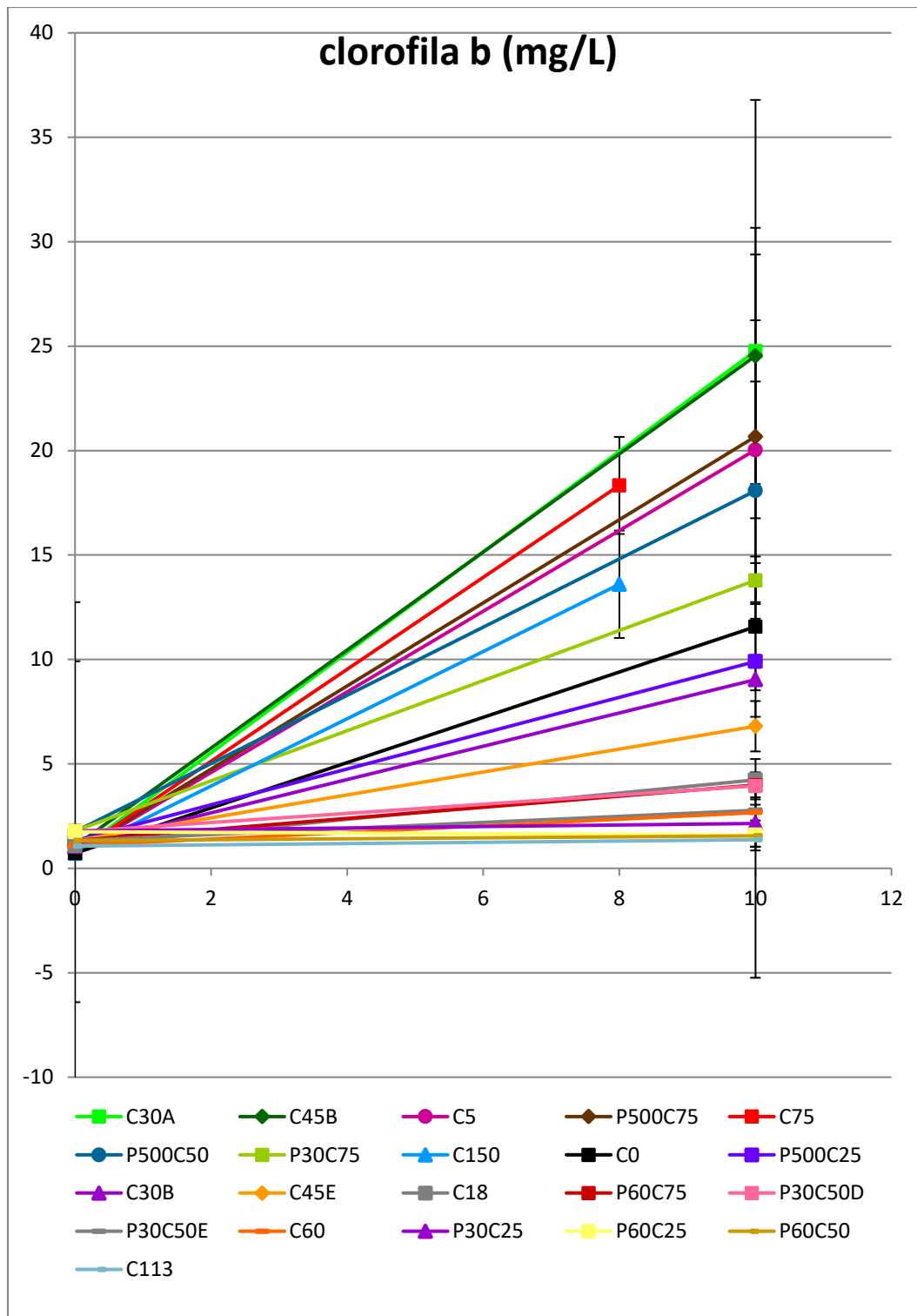


Figura 63 - Demonstração do comportamento do pigmento clorofila b ao longo do ensaio A, B, C, D, e E

A concentração do pigmento carotenóide b C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $17,440 \pm 4,754$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C30A com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $14,167 \pm 0,833$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,375 ms e 0,125 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 70%, atingindo o valor no P500C75 de ( $13,050 \pm 4,876$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor ( $13,000 \pm 2,651$ ) (mg/L d) , no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C75 com intensidade luminosa de 75 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $12,700 \pm 2,287$ ) (mg/L), no oitavo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C5 com intensidade luminosa de 5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $10,7677 \pm 2,294$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50 de ( $9,713 \pm 0,153$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (22,5 min e 7,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P30C75 de ( $7,647 \pm 0,474$ ) (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C30B com intensidade luminosa de 30 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor, ( $6,713 \pm 1,082$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C18 com intensidade luminosa de 17,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $6,690 \pm 0,375$ ) (mg/L), décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,125 ms e 0,375 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P500C25 de ( $6,577 \pm 0,909$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C0 com intensidade luminosa de 0 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor, ( $5,867 \pm 1,387$ ) (mg/L), no décimo dia do ensaio A.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de ( $4,807 \pm 0,615$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50D de ( $3,343 \pm 0,264$ ) (mg/L) no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (45 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 75%, atingindo o valor no P60C75 de ( $3,277 \pm 0,278$ ) (mg/L), no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 15 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P30C50E de ( $2,633 \pm 1,033$ ) (mg/L), no décimo dia.

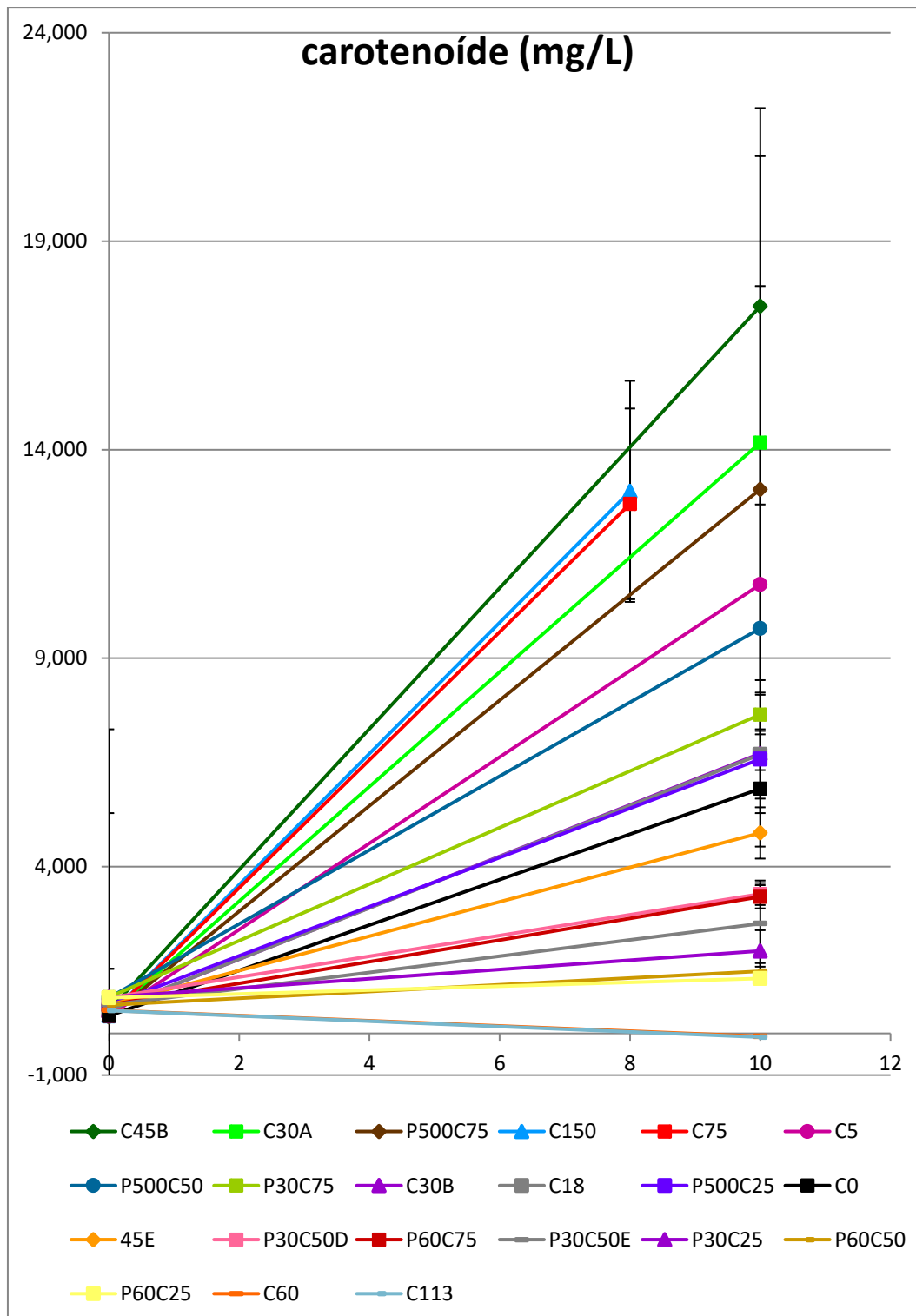
A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (7,5 min e 22,5 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P30C25 de  $(1,977 \pm 0,497) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio E atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,490 \pm 0,195) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio D atingiu o valor com intensidade luminosa de  $45 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com fotoperíodo claro e escuro de (15 min e 45 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 25%, atingindo o valor no P60C25 de  $(1,317 \pm 0,046) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C60 com intensidade luminosa de  $60 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor  $(-0,070 \pm 0,010) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia do ensaio B.

A concentração do pigmento carotenóide do ensaio C113 com intensidade luminosa de  $112,5 \text{ } (\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , com ciclo de iluminação de 100% no escuro atingiu o maior valor  $(-0,090 \pm 0,017) \text{ (mg/L)}$ , no décimo dia do ensaio B.



**Figura 64 - Demonstração do comportamento do pigmento carotenoíde ao longo do ensaio A , B, C, D, e E**

## 7. Conclusões

A avaliação do efeito da luz intermitente na taxa de crescimento da microalga *Chlorella zofingiensis* teve resultado que a intensidade luminosa com ciclo de 100% favorece as taxas de crescimento algal.

Os resultados satisfatórios apresentam com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), e ciclo de iluminação de 100%, atingindo o valor no C45E de  $(1,573 \pm 0,078) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ . Este resultado é superior em 33,65% na segunda melhor taxa de crescimento do ensaio E, com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (30 min e 30 min) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P60C50 de  $(1,177 \pm 0,736) \text{ (d}^{-1}\text{)}$ .

O fotoperíodo com maior permanência no claro obteve as melhores taxas de crescimento. O período com maior exposição ao claro favorece melhores taxas.

A melhor produtividade ocorreu no ensaio C45B com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor de  $(1,114 \pm 0,573) \text{ (g/L d)}$ . Este resultado é superior em 34,70% em relação ao ensaio D que atingiu o valor com intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com fotoperíodo claro e escuro de (0,250 ms e 0,250 ms) respectivamente e ciclo de iluminação de 50%, atingindo o valor no P500C50

de  $(0,827 \pm 0,131)$  (g/L d.). As produtividades foram maiores onde o ciclo escuro foi menor. O período escuro interfere na produtividade.

O fotoperíodo com menor permanência no escuro obteve as melhores produtividades. O período com menor exposição ao escuro favorece melhores produtividades.

A evolução do consumo de nitrato do ensaio C150 com intensidade luminosa de 150 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(158,894 \pm 23,373)$  (mg/L d), do ensaio A e a evolução do consumo de nitrato do ensaio C113 com intensidade luminosa de 112,5 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de iluminação de 100% atingiu o maior valor,  $(157,477 \pm 19,549)$  (mg/L d), do ensaio B.

A evolução do consumo de nitrato aumentou com o aumento da taxa de crescimento da cultura. Com o aumento da densidade microalgal houve necessidade de mais consumo de nutrientes, o que justifica que as maiores intensidades luminosas favoreceram as taxas de crescimento e conseqüentemente aumentam a necessidade de nutrientes.

A evolução dos pigmentos clorofila-*a*, clorofila-*b* e carotenóides ao longo do ensaio foi favorável com intensidades luminosas intermediárias, entre 30 a 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), altas e baixas intensidades luminosas provocam a inibição dos pigmentos.

## **7.1. Proposta de um futuro trabalho**

A proposta para um futuro trabalho consiste em avaliar as taxas de crescimento nos respectivos pigmentos clorofila-*a*, *b* e carotenóides da microalga *Chorella zofingiensis*, através da comparação da intensidade luminosa de 45 ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com ciclo de 100% com luzes coloridas na faixa de espectral de radiação entre 400 a 700 nm.

As mudanças de luz espectral evocam diferentes respostas morfológicas e fotossintéticas que podem variar entre diferentes espécies de algas. O objetivo deste estudo é investigar as características fotossintéticas das macroalgas *Chorella zofingiensis* cultivadas sob diferentes ambientes de espectro. Neste estudo, a *Chorella zofingiensis* será cultivada sob luz de LED azul, vermelha e verde e lâmpadas fluorescentes. A taxa de crescimento, composição de fotopigmentos, fluorescência da clorofila e atividade de enzimas antioxidantes em diferentes espectros de luz serão investigadas.

## Referências

Anon., 2009. *Guimarães, J.; Amaral, R.; Santos, M.F.; Santos, L.M.A.*. Coimbra, s.n., p. 88.

Anon., s.d. s.l.:s.n.

Anon., s.d.

Ben-Amotz, A. & Avron, M., 1983. *On the Factors Which Determine Massive beta-carotene Accumulation in the halotolerant Alga Dunaliella brdawi.* s.l.:Plant Physiol.

Borowitzka, M., 2013. High-value products from microalgae- their development and commercialisation. *Journal of Applied phycology*, Issue 25, pp. 743-756.

Brennan, L. E. & Owende, P., 2010. *Biofuels from microalgae- A Review of technologies for production, processing, and extractions of bio - fuels and co-products.* s.l.:Renewable and sustainable Energy Reviews.

Brown, H., L.L.D., F.R.S. & Escombe, F., 1905. *Researches on some of the Physiological Processes of green Leaves, with Special Reference to the interchange of Energy between the Leaf and Its Surroundings.* s.l., Proceedings of the Royal Society of London Containing Papers of a Biological Character, pp. 29-111.

Carvalho, A., Silva, S. O., Baptista, J. & Malcata, F., 2011. *Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects.* s.l.:Appl microbiol Biotechnolj.

Chisti, Y., 2008. *Biodiesel from microalgae beats bioethanol.* s.l.:Trends in Biotechnology.

Clendenning, K. & Ehrmantraut, H., 1950. Photosynthesis and Hill reactions by whole Chlorella cells in continuous and flashing light. *Arch Biochem.*, 29(2), pp. 387-403.

Combe, C. et al., 2015. Long-term adaptive response to high-frequency light signals in the unicellular photosynthetic eukaryote *Dunaliella salina*. *Biotechnol Bioeng*, 112(6), pp. 1111-1121.

Del Campo, J. et al., 2004. *CAccumulation of astaxanthin an lutein in Chorella zofingiensis(chlorophyta)*. s.l.:Applied Microbiology and Biotechnology.

Dubinsky, Z. & Matsukama, K., 1995. *Photobiological aspects of algal mass culture*. s.l.:J. Mar. Biotechnol.

Emerson, R. & Arnold, W., 1932a. A Separation of the Reactions in Photosynthesis by Means of Intermittent Light. *J Gen Physiol.*, 14(4), pp. 391-420.

Emerson, R. & Arnold, W., 1932b. The photochemical reaction in photosynthesis. 16(2), pp. 191-205.

FalkowskiI, P., Owens, T., Ley, A. & Mauzerall, D., 1981. Effects of Growth Irradiance Levels on the Ratio of Reaction Centers in Two Species of Marine Phytoplankton. *Plant Physiol*, 68(4), pp. 969-973.

Falkowski, P., Owens, T., Ley, A. & Mauzerall, D., 1981. Effects oh Growth Irradiance Levels on the Ratio of Reaction Centers in Two Species of Marine Phytoplankton. *Plant Physiol.*, 68(4), pp. 969-973.

Fatih Demirbas, M., 2009. Biorefineries for biofuel upgrading. Volume 86, pp. 151-161.

Fu, W. et al., 2012. Maximizing biomass productivity and cell density of *Chlorella vulgaris* by using light-emitting diode-based photobioreactor. *J Biotechnol*, 161(3), pp. 242-249.

Govindjee, R., 1965. Two different manifestations of enhancement in the photosynthesis of *Porphyridium cruentum* in flashing monochromatic light. *Photochemistry and Photobiology*, Volume 4, pp. 401-415.

Grobbelaar, J., Nedbal, L. & Tichý, V., 1996. Influence of high frequency light/dark fluctuations on photosynthetic characteristics of microalgae photoacclimated to different light intensities and implications for mass algal cultivation. *Journal of Applied Phycology*, 8(4-5), pp. 335-343.

Huang, G., Chen, F., Wei, D. Z. & Chen, G., 2010. *Biodiesel production by microalgal biotechnology*. s.l.:Applied Energy.

Hu, Q., 2004. *Environmental Effects on Cell Composition*. s.l.:Handbook of microalgal Culture.

HU, Q., 2004. *Environmental Effect on Cell Composition*. s.l.:Handbook of microalgal Culture: biotechnology and Applied Phycology Oxford: Blackwell Science Ltd..

Katsuda, T. et al., 2008. Effect of light intensity and frequency of flashing light from blue light emitting diodes on astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis*. *Send to*, 105(3), pp. 216-220.

Kim, C. et al., 2014. Energy-efficient cultivation of *Chlamydomonas reinhardtii* for lipid accumulation under flashing illumination conditions. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 19(1), pp. 150-158.

Kim, Z.-H., Kim, S.-H., Lee, H.-S. & Lee, C.-G., 2006. Enhanced production of astaxanthin by flashing light using *Haematococcus pluvialis*. *Enzyme and Microbial Technology*, 39(3), pp. 414-419.

Kobayashi, M., Kaizono, T., Nishio, N. & Nagai, S., 1992. *Effects of light intensity, light quality, and illuminatin cycle on astaxanthin formation in a green alga, Haematococcus pluvialis*. s.l.:Journal of Fermentation an Bioengineering.

Kok, B., 1953. Experiments on photosynthesis by *Chorella* in flashing light. Em: J. Burlew, ed. *Algal Culture: From Laboratory to Pilot Plant*. Washington(DC): Carnegie Institution of Washington Publication, pp. 63-75.

KOK, B., 1953. *Experiments on photosynthesis by Chorella in flashing light..* Washington(DC): Carnegie Institution of Washington Publication.

Kok, B., 1956. Photosynthesis in flashing light. *Biochimica et Biophysica Acta*, 21(2), pp. 245-258.

Lee, R., 2008. *Phycology*. s.l.:Cambridge university Press.

Lunka, A. & Bayless, D., 2013. Effects of flashing light-emitting diodes on algal biomass productivity. *Journal of Applied Phycology*, 25(6), pp. 1-7.

Margalith, P. Z., 1999. *Production of ketocarotenoids bu microalgae*. s.l.:Appl Microbiol Biotechnol.

Mata, T., Martins, A. & Caetano, N., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications. 14(1), pp. 217-232.

Matthijs, H. et al., 1996. Application of light-emitting diodes in bioreactors: Flashing light effects and energy economy in algal culture (*Chlorella pyrenoidosa*). *Biotechnol Bioeng*, 50(1), pp. 98-107.

Myers, J. & Graham, J.-R., 1971. The Photosynthetic Unit in *Chlorella* Measured by Repetitive Short Flashes. *Plant Physiology*, 48(3), pp. 282-286.

Myers, J. & Graham, J.-R., 1994. The 1932 experiments. *Photosynth Res.* , 40(3), pp. 303-310.

Nedbal, L., Tichý, V., Xiong, F. & Grobbelaar, J., 1996. Microscopic green algae and cyanobacteria in high-frequency intermittent light. *Journal of Applied Phycology*, 8(4-5), pp. 325-333..

Noomnarm, U. & Clegg, R., 2009. Fluorescence lifetimes: fundamentals and interpretations. *Photosynth Res.* , 101(2-3), pp. 181-194.

Orosa, M., Franqueira, D., Cid, A. & Abalde, J., 2005. Analysis and enhancement of astaxanthin accumulation in *Haematococcus pluvialis*. *Bioresource technology*, Volume 96, pp. 373-378.

Orosa, M., Torres, E., Fidalgo, P. & Abalde, J., 2000. *Production and analysis of secondary carotenoids in green algae*. s.l.:journal of Applied Phycology.

Park, K. K. D. & Lee, C., 2000. Effect of flashing light on oxygen production rates in high-density algal cultures. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 10(6), pp. 817-822.

- Park, K.-H. & Lee, C.-G., 2000. Optimization of algal photobioreactors using flashing lights. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, Volume 5, pp. 186-190.
- Phillips, J. & Myers, J., 1954. Growth Rate of Chlorella in Flashing Light. *Plant Physiology*, 29(2), pp. 152-161.
- Pulz, O. & Gross, W., 2004. *Valy of microalgaeable products from biotechnolo.* s.l.:Appl microbiol biotecnol.
- RAVEN, J. A., EVANS, M. & KORB, R., 1999. *The role of trace metals in photosyntetic electron transport in O2-evolving organisms. Photosynthesis Research.* s.l.:s.n.
- Raven, J. A., Evans, M. & Korb, R., 1999. *The role of trace metals in photosynthetic electron transport in O2- evolving organisms. Photosynthesis Research.* s.l.:s.n.
- Reike, F. & Gaffron, H., 1943. Flash Saturation an Reaction Periods in Photosynthesis. *J. Phys. Chem.*, 47(4), pp. 299-308.
- Rosa, J. M. C., 2011. *Modelação e Optimização de uma Unidade de Produção de microalgas.* Coimbra, s.n.
- Sforza, E. et al., 2012. Adjusted light and dark cycles can optimize photosynthetic efficiency in algae growing in photobioreactors. *PLoS One*, 7(6), p. e38975.
- Silva, C., Mendes, A. & Caetano, N., 2018. Influence of Light Intensity and Photoperiod on Growth of Chromochloris zofingiensis. *Submitted to Applied Sciences.*
- Stephens, E. et al., 2010. *An economic and techical evaluation of microalgal biofuels.* s.l.:Nat Biotech.
- Sukeni, A., Carmeli, Y. & Berner, T., 1989. 25 ed. s.l.:Journal of Phycology.
- Sukenik, A., Bennett, J. & Falkowski, P., 1987. Light-saturated photosynthesis — Limitation by electron transport or carbon fixation?. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 891(3), pp. 205-215.

SUKENIK, A. C. Y. & B. T., 1989. *Regulation of Fatty Acid Composition by Irradiance Level in the Eustigmatophyte Nannochloropsis Sp.1.* s.l.:Journal of Phycology.

Tamiya, H. & Chiba, Y., 1949. Analysis of photosynthetic mechanism by the method of intermittent illumination. *Stud. Tokugawa Inst.*, Volume 6, pp. 1-129.

Technology, o. H., 2018. [Online].

Terry, K., 1986. Photosynthesis in Modulated Light: Quantitative Dependence of Photosynthetic Enhancement on Flashing Rate. *Biotechnol Bioeng*, 28(7), pp. 988-995.

Tomaselli, L., 2004. *The microalgal cell. Em Richmond, A.* Oxford: Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology.

Tredici, M., Carozzi, P., Chini Zittelli, G. & Materassi, R., 1991. *A vertical alveolar panel (VAP) for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria.* s.l.:Bioresource Technology.

Vejrazka, C. & Janssen M, B. G. S. M. W. R., 2013. Photosynthetic efficiency and oxygen evolution of *Chlamydomonas reinhardtii* under continuous and flashing light. *Appl Microbiol Biotechnol*, 97(4), pp. 1523-1532.

Vejrazka, C., Janssen, M., Streefland, M. & Wijffels, R., 2011. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in flashing light. *Biotechnol Bioeng*, 108(12), pp. 2905-2913.

Vejrazka, C., Janssen, M., Streefland, M. & Wijffels, R., 2012. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in attenuated, flashing light. *Biotechnol Bioeng*, 109(10), pp. 2567-2574.

Walker, T., Purton, S. & Becker, D. C., 2005. *Microalgae as bioreactors Plant Cell Reports.* s.l.:s.n.

Wang, B., Li, Y., Wu, N. & Lan, C. C., 2008. *bio-mitigation using microalgae.* s.l.:Applied Microbiology and Biotechnology.

Wang, S., Stiles, A. G. C. & Liu, C., 2014. Microalgae cultivation in photobioreactors: An overview of light characteristics. *Eng. Life Sci.*, Volume 14, pp. 550-559.

Weller, S. F. J., 1941. Photosynthesis in Flashing light. *J. Phys. Chem.*, 45(9), pp. 1359-1373.

XueE, S., Su, Z. & Cong, W., 2011. Growth of *Spirulina platensis* enhanced under intermittent illumination. *J Biotechnol*, 151(3), pp. 271-277.

Zarmi, Y., Bel, G. & Aflalo, C., 2013. Theoretical Analysis of Culture Growth in Flat-Plate Bioreactors: The Essential Role of Timescales. Em: A. Richmond & Q. Hu, edits. *Handbook of Microalgal Culture*. s.l.:Wiley, pp. 205-224.



## Anexo A.

### 1 Preparação do meio de cultura BBM (Bold's Basal Medium)

Para BBM-3N utiliza-se o triplo da quantidade de  $\text{NaNO}_3$  do meio original (Bischoff, & Bold, 1963). A Tabela 18 demonstra a concentração do macro e micronutrientes contida na solução BBM.

**Tabela 18 - Concentração dos macro e micronutrientes contida na solução BBM**

	Solução	Reagentes	Concentração (mg/L)
MACRONUTRIENTE	SL 1	$\text{NaNO}_3$	250
	SL 2	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	75
	SL 3	$\text{NaCl}$	25
	SL 4	$\text{K}_2\text{HPO}_4$	75
	SL 5	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	175
	SL 6	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	25
	SL 7	$\text{H}_3\text{BO}_3$	11,4
MICRONUTRIENTE	SL 8	$\text{EDTA} \cdot \text{Na} + \text{KOH}$	50 +31
	SL 9	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4$	49,8
	SL 10	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	88,3
	SL 11	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	14,4
	SL 12	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	15,7
	SL 13	$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4,9
	SL 14	$\text{MoO}_3$	7,1

## 2 Diferentes regimes de luz

A Tabela 19 representa os diferentes regimes de luz dos experimentos.

**Tabela 19 - Diferentes regimes de luz dos experimentos. Último dia de cultivo, tempo PPFD (PPFDav), duração e PPFD em ambos os períodos de alta luz e baixa luz e a proporção entre o PPFD em período de luz baixa e alta (PPFDL / PPFDH).**

Data de início do ensaio	PBRs correspondentes	High light period		Low light period		Ciclo de iluminação	
		PPFDav / $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Duração	PPFDH / $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Duração		PPFDL / $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
28/03/2017	#(1, 2,3)	150,0				100%	
	#(4,5, 6)	75,0				100%	
	#(7, 8, 9)	30,0				100%	
	#(10,11, 12)	5,0				100%	
	#(13, 14,15)	0,0				100%	
18/04/2017	#(1, 2,3)	112,5				100%	
	#(4,5, 6)	60,0				100%	
	#(7, 8, 9)	45,0				100%	
	#(10,11, 12)	17,5				100%	
	#(13, 14,15)	30,0				100%	
09/05/2017	#(1, 2,3)	descartado					
	#(4,5, 6)	descartado					
	#(7, 8, 9)	descartado					
	#(10,11, 12)	45,0	0,375 ms	60	0,125 ms	0	75%
	#(13, 14,15)	descartado					
06/06/2017	#(1, 2,3)	45,0	15 min	180	45 min	0	25%
	#(4,5, 6)	45,0	7,5 min	180	22,5 min	0	25%
	#(7, 8, 9)	45,0	15 min	90	15 min	0	50%
	#(10,11, 12)	45,0	22,5 min	60	7,5 min	0	75%
	#(13, 14,15)	45,0	0,250 ms	90*	0,250 ms	0	50%
27/06/2017	#(1, 2,3)	45,0	45 min	60	15 min	0	75%
	#(4,5, 6)	45,0	30 min	90	30 min	0	50%
	#(7, 8, 9)	45,0	15 min	90	15 min	0	50%
	#(10,11, 12)	45,0					100%
	#(13, 14,15)	45,0	0,125 ms	180*	0,375 ms	0	25%

## 3 Resumo da taxa de crescimento (DW) do ensaio A.

Refere-se ao primeiro conjunto de ensaios A.

A demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio A.

A Tabela 20 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio A.

A Tabela 21 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 22 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

A Tabela 23 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

**Tabela 20 - Concentração do peso seco do ensaio A**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,120	0,109	0,146	0,247	0,64	1,85	1,895			
#2	0,120	0,137	0,179	0,47	0,919	1,798	2,122			
#3	0,120	0,143	0,088	0,535	1,104	2,393	2,975			
#4	0,120	0,15	0,155	0,298	0,561	1,45	1,831	2,548		
#5	0,120	0,147	0,081	0,225	0,377	1,036	1,262	1,908		
#6	0,120	0,125	0,17	0,342	0,591	1,359	1,908	2,613		
#7	0,120	0,12	0,127	0,149	0,146	0,291	0,457	0,479	0,639	0,864
#8	0,120	0,103	0,073	0,092	0,127	0,241	0,333	0,462	0,662	0,856
#9	0,120	0,118	0,083	0,115	0,13	0,249	0,367	0,382	0,591	0,791
#10	0,120	0,089	0,043	0,074	0,059	0,087	0,128	0,15	0,162	0,183
#11	0,120	0,132	0,074	0,069	0,064	0,093	0,095	0,109	0,124	0,11
#12	0,120		0,091	0,09	0,205	0,088	0,122	0,14	0,155	0,159
#13	0,120	0,098	0,064	0,061	0,068	0,083	0,078	0,088	0,09	0,088
#14	0,120	0,086	0,059	0,088	0,056	0,066	0,07	0,065	0,095	0,084
#15	0,120	0,102	0,073	0,069	0,05	0,051	0,068	0,068	0,086	0,077

**Tabela 21 - Concentração do peso seco após tratamento de dados**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,120	0,140	0,146	0,247	0,640	1,850	1,895			
#2	0,120	0,137	0,179	0,470	0,919	1,798	2,122			
#3	0,120	0,143	0,163	0,535	1,104	2,393	2,975			
#4	0,120	0,150	0,155	0,298	0,561	1,450	1,831	2,548		
#5	0,120	0,147	0,163	0,225	0,377	1,036	1,262	1,908		
#6	0,120	0,125	0,170	0,342	0,591	1,359	1,908	2,613		
#7	0,120	0,120	0,127	0,149	0,146	0,291	0,457	0,479	0,639	0,864
#8	0,120	0,103	0,073	0,092	0,127	0,241	0,333	0,462	0,662	0,856
#9	0,120	0,118	0,083	0,115	0,130	0,249	0,367	0,382	0,591	0,791
#10	0,120	0,089	0,043	0,074	0,059	0,087	0,128	0,150	0,162	0,183
#11	0,120	0,132	0,074	0,069	0,064	0,093	0,095	0,109	0,124	0,110
#12	0,120	0,111	0,091	0,090	0,205	0,088	0,122	0,140	0,155	0,159
#13	0,120	0,098	0,064	0,061	0,068	0,083	0,078	0,088	0,090	0,088
#14	0,120	0,086	0,059	0,088	0,056	0,066	0,070	0,065	0,095	0,084
#15	0,120	0,102	0,073	0,069	0,050	0,051	0,068	0,068	0,086	0,077

**Tabela 22 - Resumo da taxa de crescimento do primeiro grupo de ensaio A**

$\mu(d-1)$	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	0,154	0,044	0,524	0,951	0,531	0,024			
#2	0,000	0,132	0,265	0,966	0,672	0,336	0,165			
#3	0,000	0,175	0,128	1,192	0,724	0,387	0,218			
#4	0,000	0,224	0,034	0,649	0,634	0,474	0,234	0,331		
#5	0,000	0,200	0,103	0,326	0,514	0,506	0,197	0,413		
#6	0,000	0,040	0,306	0,700	0,548	0,416	0,339	0,314		
#7	0,000	0,000	0,056	0,160	-0,017	0,344	0,450	0,047	0,289	0,302
#8	0,000	-0,151	-0,350	0,236	0,321	0,320	0,323	0,328	0,360	
#9	0,000	-0,020	-0,349	0,328	0,116	0,325	0,391	0,038	0,437	0,292
#10	0,000	-0,302	-0,724	0,543	-0,235	0,198	0,389	0,158	0,075	0,120
#11	0,000	0,096	-0,580	-0,072	-0,078	0,191	0,014	0,140	0,133	-0,121
#12	0,000	-0,083	-0,196	-0,014	0,826	-0,420	0,323	0,138	0,105	0,025
#13	0,000	-0,199	-0,435	-0,041	0,100	0,103	-0,064	0,125	0,015	-0,015
#14	0,000	-0,329	-0,389	0,411	-0,456	0,085	0,057	-0,077	0,377	-0,116
#15	0,000	-0,163	-0,339	-0,055	-0,330	0,013	0,286	0,000	0,237	-0,112

**Tabela 23 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio A**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu$ (d-1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,154	0,146	0,894	0,782	0,418	0,136			
C75	0,000	0,155	0,147	0,558	0,565	0,466	0,257	0,353		
C30	0,000	-0,057	-0,214	0,241	0,140	0,330	0,388	0,138	0,362	0,297
C5	0,000	-0,096	-0,500	0,152	0,171	-0,010	0,242	0,145	0,104	0,008
C0	0,000	-0,230	-0,388	0,105	-0,229	0,067	0,093	0,016	0,209	-0,081
dp										
C150	0,000	0,022	0,156	0,340	0,149	0,101	0,100			
C75	0,000	0,100	0,141	0,203	0,062	0,046	0,074	0,053		
C30	0,000	0,082	0,234	0,085	0,171	0,013	0,064	0,165	0,074	0,007
C5	0,000	0,199	0,273	0,340	0,573	0,355	0,200	0,011	0,029	0,122
C0	0,000	0,088	0,048	0,265	0,292	0,048	0,178	0,101	0,183	0,057

## 4 Produtividade do ensaio A

Refere-se à produtividade diária das diferentes concentrações das biomassas diárias e seus respectivos dias (g/L d) do primeiro conjunto de ensaios A.

A Tabela 24 demonstra a produtividade de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 25 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

**Tabela 24 - Produtividade do ensaio A**

P (g/L d)	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	0,020	0,006	0,101	0,393	0,605	0,045			
#2	0,000	0,017	0,042	0,291	0,450	0,440	0,323			
#3	0,000	0,023	0,019	0,373	0,569	0,644	0,582			
#4	0,000	0,030	0,005	0,142	0,264	0,444	0,381	0,717		
#5	0,000	0,027	0,016	0,063	0,151	0,330	0,226	0,646		
#6	0,000	0,005	0,045	0,172	0,249	0,384	0,549	0,704		
#7	0,000	0,000	0,007	0,022	-0,003	0,072	0,165	0,022	0,160	0,225
#8	0,000	-0,017	-0,031	0,019	0,035	0,057	0,092	0,129	0,200	0,194
#9	0,000	-0,002	-0,035	0,032	0,014	0,059	0,119	0,014	0,290	0,200
#10	0,000	-0,031	-0,046	0,031	-0,016	0,014	0,041	0,022	0,012	0,021
#11	0,000	0,012	-0,058	-0,005	-0,005	0,015	0,001	0,014	0,016	-0,014
#12	0,000	-0,010	-0,020	-0,001	0,115	-0,058	0,034	0,018	0,016	0,004
#13	0,000	-0,022	-0,035	-0,003	0,006	0,008	-0,005	0,010	0,001	-0,001
#14	0,000	-0,034	-0,028	0,030	-0,032	0,005	0,004	-0,005	0,030	-0,010
#15	0,000	-0,018	-0,029	-0,004	-0,019	0,001	0,017	0,000	0,018	-0,009

**Tabela 25 - Média e desvio padrão da produtividade do ensaio A**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (g/L d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,020	0,023	0,255	0,470	0,563	0,317			
C75	0,000	0,021	0,022	0,126	0,221	0,386	0,386	0,689		
C30A	0,000	-0,006	-0,019	0,025	0,016	0,063	0,125	0,055	0,190	0,206
C5	0,000	-0,010	-0,041	0,008	0,031	-0,010	0,025	0,018	0,014	0,003
C0	0,000	-0,024	-0,031	0,008	-0,015	0,005	0,005	0,002	0,016	-0,007
dp										
C150	0,000	0,003	0,018	0,140	0,090	0,109	0,268			
C75	0,000	0,014	0,020	0,056	0,061	0,057	0,162	0,038		
C30	0,000	0,009	0,023	0,007	0,019	0,008	0,037	0,064	0,026	0,016
C5	0,000	0,022	0,020	0,020	0,073	0,042	0,021	0,004	0,002	0,017
C0	0,000	0,008	0,004	0,019	0,020	0,004	0,011	0,008	0,014	0,005

## 5 Evolução do consumo de nitrato do primeiro grupo de ensaio A

Refere-se ao consumo específico do primeiro conjunto de ensaios A.

A Tabela 26 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 27 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio A, após tratamento de dados.

A Tabela 28 demonstra a evolução do consumo de nitrato (mg/L d) de cada reator do primeiro grupo de ensaio A.

A Tabela 29 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo de nitrato (mg/L d) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio A.

**Tabela 26 - Concentração do nitrato do ensaio A**

NO3 (mg/L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	d /dados	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1		619,422	587,454	517,336	470,382	337,687	40,653	61,068			
#2		595,902	593,579	514,274	420,366	253,987	37,591	44,736			
#3		619,422	581,33	501,004	401,993	224,385	31,467	39,632			
#4		595,902	590,857	544,896	476,507	391,786	137,623	32,487	52,902		
#5		619,422	646,657	565,311	521,419	456,092	267,256	131,499	36,57		
#6		595,902	595,62	567,352	491,818	431,594	203,971	23,301	31,467		
#7		619,422	605,147	585,725	559,186	547,958	519,378	483,652	458,133	448,947	356,06
#8		595,902	615,355	583,684	557,145	708,213	541,834	525,502	509,17	441,802	407,097
#9		619,422	607,189	578,58	547,958	544,896	492,838	518,357	474,465	463,237	416,283
#10		595,902	880,065	581,642	565,311	567,352	570,414	603,078	581,642	564,29	591,85
#11		619,422	1014,80	1179,79	1146,10	1159,37	1229,80	1127,73	1132,83	1186,93	1215,51
#12		595,902		601,036	575,518	577,559	579,601	643,907	584,705	642,886	647,99
#13		619,422	636,45	584,705	583,684	595,933	583,684	639,824	584,705	651,052	732,711
#14		595,902	621,479	610,223	594,912	595,933	607,161	621,451	555,103	639,824	680,654
#15		619,422	618,076	597,974	579,601	578,58	586,746	573,476	614,306	590,829	610,223

**Tabela 27 - Concentração de nitrato após tratamento de dados do ensaio A**

NO3mg /L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10	
	d c/dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1		619,422	587,454	517,336	470,382	337,687	40,653	61,068			
#2		595,902	593,579	514,274	420,366	253,987	37,591	44,736			
#3		619,422	581,33	501,004	401,993	224,385	31,467	39,632			
#4		595,902	590,857	544,896	476,507	391,786	137,623	32,487	52,902		
#5		619,422	593,238	565,311	521,419	456,092	267,256	131,499	36,57		
#6		595,902	595,62	567,352	491,818	431,594	203,971	23,301	31,467		
#7		619,422	605,147	585,725	559,186	547,958	519,378	483,652	458,133	448,947	356,06
#8		595,902	606,168	583,684	557,145	546,427	541,834	525,502	509,17	441,802	407,097
#9		619,422	607,189	578,58	547,958	544,896	530,606	504,577	474,465	463,237	416,283
#10		595,902	595,902	581,642	565,311	567,352	570,414	603,078	581,642	564,29	591,85
#11		619,422	619,422	581,642	570,414	572,455	575,007	623,492	583,173	603,588	619,92
#12		595,902	595,902	581,642	575,518	577,559	579,601	643,907	584,705	642,886	647,99
#13		619,422	636,45	584,705	583,684	595,933	583,684	639,824	584,705	651,052	732,711
#14		595,902	621,479	610,223	594,912	595,933	585,215	621,451	555,103	639,824	680,654
#15		619,422	618,076	597,974	579,601	578,58	586,746	573,476	569,904	590,829	610,223

**Tabela 28 - Evolução do consumo de nitrato diário do ensaio A**

ECN mg/L.d	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	31,968	70,118	46,954	132,695	148,517	-20,415	61,068	0,000	0,000
#2	0,000	2,323	79,305	93,908	166,379	108,198	-7,145	44,736	0,000	0,000
#3	0,000	38,092	80,326	99,011	177,608	96,459	-8,165	39,632	0,000	0,000
#4	0,000	5,045	45,961	68,389	84,721	127,082	105,136	-20,415	52,902	0,000
#5	0,000	26,184	27,927	43,892	65,327	94,418	135,757	94,929	36,570	0,000
#6	0,000	0,282	28,268	75,534	60,224	113,812	180,670	-8,166	31,467	0,000
#7	0,000	14,275	19,422	26,539	11,228	14,290	35,726	25,519	9,186	92,887
#8	0,000	-10,266	22,484	26,539	10,718	2,296	16,332	16,332	67,368	34,705
#9	0,000	12,233	28,609	30,622	3,062	7,145	26,029	30,112	11,228	46,954
#10	0,000	0,000	14,260	16,331	-2,041	-1,531	-32,664	21,436	17,352	-27,560
#11	0,000	0,000	37,780	11,228	-2,041	-1,276	-48,485	40,319	-20,414	-16,332
#12	0,000	0,000	14,260	6,124	-2,041	-1,021	-64,306	59,202	-58,181	-5,104
#13	0,000	-17,028	51,745	1,021	-12,249	6,125	-56,140	55,119	-66,347	-81,659
#14	0,000	-25,577	11,256	15,311	-1,021	5,359	-36,236	66,348	-84,721	-40,830
#15	0,000	1,346	20,102	18,373	1,021	-4,083	13,270	3,572	-20,925	-19,394

**Tabela 29 Média e desvio padrão da evolução de consumo de nitrato do ensaio A.**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	24,128	76,583	79,958	158,894	117,725	-11,908	48,479	0,000	0,000
C75	0,000	10,504	34,052	62,605	70,091	111,770	140,521	22,116	40,313	0,000
C30A	0,000	5,414	23,505	27,900	8,336	7,910	26,029	23,988	29,261	58,182
C5	0,000	0,000	22,100	11,228	-2,041	-1,276	-48,485	40,319	-20,414	-16,332
C0	0,000	-13,753	27,701	11,568	-4,083	2,467	-26,369	41,680	-57,331	-47,294
dp										
C150	0,000	19,130	5,622	28,696	23,373	27,305	7,385	11,197	0,000	0,000
C75	0,000	13,787	10,315	16,595	12,925	16,427	37,992	63,355	11,197	0,000
C30A	0,000	13,618	4,678	2,357	4,575	6,033	9,697	7,016	33,018	30,673
C5	0,000	0,000	13,579	5,104	0,000	0,255	15,821	18,883	37,767	11,228
C0	0,000	13,757	21,287	9,262	7,145	5,685	35,742	33,476	32,840	31,632

## 6 Resumo da taxa de crescimento (DW) do ensaio B

Refere-se ao primeiro conjunto de ensaios B.

A Tabela 30 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio B.

A Tabela 31 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio B.

A Tabela 32 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 33 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

**Tabela 30 - Concentração do peso seco do ensaio B**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,124	0,075	0,237	0,342	0,433	1,577				
#2	0,125	0,073	0,11	0,25	0,666	2,326	2,501	3,397		
#3	0,124	0,064	0,146	0,262	0,628	2,238	2,796	3,171		
#4	0,124	0,12	0,119	0,209	0,443	1,318	1,658	1,947	2,484	
#5	0,125	0,065	0,162	0,432	0,548	1,73	1,564	1,755	2,397	
#6	0,124	0,124	0,134	0,26	0,403	0,749	1,29	1,648	2,673	
#7	0,124	0,073	0,05	0,101	0,192	0,601	0,754	0,709	1,051	1,8
#8	0,125	0,069	0,135	0,215	0,398	1,309	1,462	2,186	2,727	2,37
#9	0,124	0,137	0,123	0,133	0,301	0,996	1,225	1,934	3,620	3,407
#10	0,124	0,067	0,105	0,158	0,18	0,4	0,441	0,598	0,862	0,958
#11	0,125	0,055	0,125	0,151	0,192	0,386	0,386	0,517	0,758	0,891
#12	0,124	0,034	0,061	0,077	0,211	0,177	0,203	0,309	0,403	0,515
#13	0,124	0,079	0,103	0,126	0,223	0,242	0,641	0,795	1,14	1,27
#14	0,125	0,102	0,167	0,206	0,261	0,461	0,468	0,559	0,81	1,105
#15	0,124	0,047	0,146	0,149	0,186	0,341	0,387	0,608	0,703	0,918

**Tabela 31 - Concentração do peso seco após tratamento de dados do ensaio B**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,124	0,075	0,128	0,342	0,433	1,577	2,6485	3,284		
#2	0,125	0,073	0,11	0,25	0,666	2,326	2,501	3,397		
#3	0,124	0,064	0,146	0,262	0,628	2,238	2,796	3,171		
#4	0,124	0,120	0,148	0,209	0,443	1,318	1,658	1,947	2,484	
#5	0,125	0,122	0,162	0,432	0,548	1,73	1,564	1,755	2,397	
#6	0,124	0,124	0,134	0,26	0,403	0,749	1,29	1,648	2,673	
#7	0,124	0,073	0,129	0,174	0,192	0,601	0,754	2,06	3,1735	1,8
#8	0,125	0,069	0,135	0,215	0,398	1,309	1,462	2,186	2,727	2,37
#9	0,124	0,137	0,123	0,133	0,301	0,996	1,225	1,934	3,620	3,407
#10	0,124	0,067	0,105	0,158	0,18	0,4	0,441	0,598	0,862	0,958
#11	0,125	0,055	0,125	0,151	0,192	0,386	0,386	0,517	0,758	0,891
#12	0,124	0,034	0,061	0,077	0,211	0,393	0,4135	0,5575	0,810	0,925
#13	0,124	0,079	0,103	0,126	0,223	0,242	0,641	0,795	1,140	1,270
#14	0,125	0,102	0,167	0,206	0,261	0,461	0,468	0,559	0,810	1,105
#15	0,124	0,047	0,146	0,149	0,186	0,341	0,387	0,608	0,703	0,918

**Tabela 32 - Taxa de crescimento do ensaio B**

$\mu(d^{-1})$	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,503	0,535	0,983	0,236	0,646	0,518	0,215		
#2	0,000	-0,538	0,410	0,821	0,980	0,625	0,073	0,306		
#3	0,000	-0,661	0,825	0,585	0,874	0,635	0,223	0,126		
#4	0,000	-0,033	0,210	0,345	0,751	0,545	0,229	0,161	0,244	
#5	0,000	-0,024	0,284	0,981	0,238	0,575	-0,101	0,115	0,312	
#6	0,000	0,000	0,078	0,663	0,438	0,310	0,544	0,245	0,484	
#7	0,000	-0,530	0,569	0,299	0,098	0,571	0,227	1,005	0,432	-0,567
#8	0,000	-0,594	0,671	0,465	0,616	0,595	0,111	0,402	0,221	-0,140
#9	0,000	0,100	-0,108	0,078	0,817	0,598	0,207	0,457	0,602	-0,061
#10	0,000	-0,616	0,449	0,409	0,130	0,399	0,098	0,305	0,366	0,106
#11	0,000	-0,821	0,821	0,189	0,240	0,349	0,000	0,292	0,383	0,162
#12	0,000	-1,294	0,585	0,233	1,008	0,311	0,051	0,299	0,374	0,132
#13	0,000	-0,451	0,265	0,202	0,571	0,041	0,974	0,215	0,360	0,108
#14	0,000	-0,203	0,493	0,210	0,237	0,284	0,015	0,178	0,371	0,311
#15	0,000	-0,970	1,133	0,020	0,222	0,303	0,127	0,452	0,145	0,267

**Tabela 33 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu(d^{-1})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	0,000	-0,567	0,590	0,796	0,697	0,636	0,271	0,216		
C60	0,000	-0,019	0,190	0,663	0,476	0,477	0,224	0,174	0,346	
C45B	0,000	-0,341	0,378	0,281	0,510	0,588	0,181	0,621	0,427	-0,256
C18	0,000	-0,910	0,618	0,277	0,460	0,353	0,049	0,299	0,374	0,133
C30	0,000	-0,541	0,631	0,144	0,343	0,209	0,372	0,282	0,292	0,228
dp										
C113	0,000	0,083	0,088	0,200	0,402	0,010	0,227	0,090		
C60	0,000	0,017	0,104	0,318	0,259	0,145	0,322	0,066		
C45B	0,000	0,383	0,423	0,194	0,371	0,015	0,062	0,333	0,203	0,272
C18	0,000	0,348	0,188	0,116	0,478	0,044	0,049	0,006	0,008	0,028
C30	0,000	0,391	0,450	0,107	0,197	0,146	0,524	0,149	0,127	0,107

## 7 Produtividade do ensaio B

Refere-se à produtividade do primeiro conjunto de ensaios B.

A Tabela 34 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 35 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

**Tabela 34 - Produtividade do ensaio B**

Pg/L d	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,049	0,053	0,214	0,091	0,572	1,072			
#2	0,000	-0,052	0,037	0,140	0,416	0,830	0,175			
#3	0,000	-0,060	0,082	0,116	0,366	0,805	0,558			
#4	0,000	-0,004	0,028	0,061	0,234	0,438	0,340	0,289	0,537	
#5	0,000	-0,003	0,040	0,270	0,116	0,591	-0,166	0,191	0,642	
#6	0,000	0,000	0,010	0,126	0,143	0,173	0,541	0,358	1,025	
#7	0,000	-0,051	0,056	0,045	0,018	0,205	0,153	1,306	1,114	-1,374
#8	0,000	-0,056	0,066	0,080	0,183	0,456	0,153	0,724	0,541	-0,357
#9	0,000	0,013	-0,014	0,010	0,168	0,348	0,229	0,709	1,686	-0,213
#10	0,000	-0,057	0,038	0,053	0,022	0,110	0,041	0,157	0,264	0,096
#11	0,000	-0,070	0,070	0,026	0,041	0,097	0,000	0,131	0,241	0,133
#12	0,000	-0,090	0,027	0,016	0,134	0,091	0,021	0,144	0,253	0,115
#13	0,000	-0,045	0,024	0,023	0,097	0,009	0,399	0,154	0,345	0,130
#14	0,000	-0,023	0,065	0,039	0,055	0,100	0,007	0,091	0,251	0,295
#15	0,000	-0,077	0,099	0,003	0,037	0,078	0,046	0,221	0,095	0,215

**Tabela 35 - Média e desvio padrão do ensaio B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P g/L d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	0,000	-0,054	0,057	0,157	0,291	0,736	0,602			
C60	0,000	-0,002	0,026	0,152	0,164	0,401	0,238	0,279		
C45B	0,000	-0,031	0,036	0,045	0,123	0,336	0,178	0,913	1,114	-0,648
C18	0,000	-0,072	0,045	0,032	0,066	0,099	0,021	0,144	0,253	0,115
C30	0,000	-0,048	0,063	0,022	0,063	0,062	0,151	0,155	0,230	0,213
dp										
C113	0,000	0,006	0,023	0,051	0,175	0,142	0,450			
C60	0,000	0,002	0,015	0,107	0,062	0,211	0,364	0,084		
C45B	0,000	0,038	0,044	0,035	0,091	0,126	0,044	0,340	0,573	0,633
C18	0,000	0,017	0,022	0,019	0,060	0,010	0,021	0,013	0,012	0,019
C30	0,000	0,027	0,038	0,018	0,031	0,047	0,216	0,065	0,126	0,083

## 8 Evolução do consumo de nitrato diário do primeiro grupo de ensaio B

Refere-se ao consumo específico do primeiro conjunto de ensaios B.

A Tabela 37 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B. A Tabela 38 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio B, após tratamento de dados.

A Tabela 38 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio B.

A Tabela 39 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio B.

**Tabela 36 - Resumo da concentração de nitrato do primeiro grupo de ensaio B**

NO3 mg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	619,422	586,746	485,608	355,975	328,585	58,771	50,861			9,351
#2	595,902	579,601	599,930	484,928	373,838	35,635	32,487	76,379		13,774
#3	619,422	590,829	568,288	483,567	365,672	28,830	18,197	44,736		10,371
#4	595,902	664,322	465,534	515,890	424,534	247,947	165,183	94,752	72,041	11,052
#5	619,422	569,394	540,047	454,986	363,631	165,268	34,529	36,570	41,759	12,413
#6	595,902	583,684	631,914	487,650	408,203	272,105	180,494	160,079	90,754	8,330
#7	619,422	608,181	566,927	537,325	506,874	410,244	318,293	308,086	211,541	123,503
#8	595,902	581,642	616,262	515,210	446,310	290,478	179,473	172,328	45,842	37,591
#9	619,422	556,124	538,686	514,189	453,115	327,905	189,680	133,540	22,705	23,301
#10	595,902	609,202	663,897	552,977	547,363	515,039	450,988	454,051	405,140	354,699
#11	619,422	601,036	623,067	544,471	555,188	542,259	485,693	501,004	446,310	388,043
#12	595,902	610,223	549,915	516,911	505,853	506,874	468,341	501,004	451,073	417,644
#13	619,422	560,207	493,774	496,156	476,252	412,286	369,330	391,786	317,017	250,244
#14	595,902	562,248	481,866	402,929	392,892	352,062	327,480	313,189	255,433	214,518
#15	619,422	571,435	505,342	465,534	433,381	411,605	356,060	362,184	334,710	281,206

**Tabela 37 - Resumo da concentração de nitrato do primeiro grupo de ensaio B após tratamento de dados**

DW mg/L)	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,124	0,075	0,128	0,342	0,433	1,577	2,649	3,284		
#2	0,125	0,073	0,110	0,250	0,666	2,326	2,501	3,397		
#3	0,124	0,064	0,146	0,262	0,628	2,238	2,796	3,171		
#4	0,124	0,120	0,148	0,209	0,443	1,318	1,658	1,947	2,484	
#5	0,125	0,122	0,162	0,432	0,548	1,730	1,564	1,755	2,397	
#6	0,124	0,124	0,134	0,260	0,403	0,749	1,290	1,648	2,673	
#7	0,124	0,073	0,129	0,174	0,192	0,601	0,754	2,060	3,174	1,800
#8	0,125	0,069	0,135	0,215	0,398	1,309	1,462	2,186	2,727	2,370
#9	0,124	0,137	0,123	0,133	0,301	0,996	1,225	1,934	3,620	3,407
#10	0,124	0,067	0,105	0,158	0,180	0,400	0,441	0,598	0,862	0,958
#11	0,125	0,055	0,125	0,151	0,192	0,386	0,386	0,517	0,758	0,891
#12	0,124	0,034	0,061	0,077	0,211	0,393	0,414	0,558	0,810	0,925
#13	0,124	0,079	0,103	0,126	0,223	0,242	0,641	0,795	1,140	1,270
#12	0,125	0,102	0,167	0,206	0,261	0,461	0,468	0,559	0,810	1,105
#15	0,124	0,047	0,146	0,149	0,186	0,341	0,387	0,608	0,703	0,918

**Tabela 38 - Resumo da evolução do consumo diário nitrato do primeiro grupo de ensaio B**

ECN mg/L d	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	32,676	101,138	129,633	27,390	134,907	7,911	-9,697		-4,676
#2	0,000	16,301	52,653	42,020	111,090	169,102	3,147	-43,892		-6,887
#3	0,000	28,593	22,541	84,721	117,895	168,421	10,633	-26,539		-5,186
#4	0,000	19,363	111,005	-5,784	46,784	88,294	82,765	70,431	22,711	60,989
#5	0,000	50,029	29,346	85,061	91,356	51,802	87,188	136,268	-5,189	29,346
#6	0,000	12,218	80,893	15,141	79,447	68,049	91,611	20,415	69,325	82,424
#7	0,000	11,241	41,255	29,601	30,452	48,315	91,951	10,207	96,544	88,038
#8	0,000	14,260	28,836	37,597	68,900	77,916	111,005	7,145	126,486	8,251
#9	0,000	63,298	17,438	24,498	61,074	62,605	138,224	56,140	110,835	-0,596
#10	0,000	-13,300	22,711	33,514	5,614	16,162	38,022	22,967	48,910	50,441
#11	0,000	18,386	-22,031	78,597	17,863	7,826	25,263	-15,311	54,694	58,267
#12	0,000	-14,321	60,308	33,004	11,058	-0,510	38,533	-32,664	49,931	33,429
#13	0,000	59,215	66,433	59,543	21,095	0,425	42,956	31,643	20,670	66,773
#14	0,000	33,654	80,383	78,937	10,037	20,415	24,583	14,290	57,757	40,915
#15	0,000	47,987	66,093	39,809	32,153	10,888	55,545	-6,124	27,475	53,504

**Tabela 39 - Média e desvio padrão da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	0,000	25,857	58,777	85,458	85,458	157,47	7,230	-26,709		-5,583
C60	0,000	27,203	73,748	31,473	72,529	69,382	87,188	75,704	28,949	57,586
C45 B	0,000	29,600	29,176	30,565	53,475	62,945	113,72	24,498	111,28	31,898
C18	0,000	-3,078	20,330	48,371	11,512	7,826	33,939	-8,336	51,178	47,379
C30B	0,000	46,952	70,969	59,429	21,095	10,576	41,028	13,270	35,300	53,730
dp										
C113	0,000	8,524	39,655	43,811	50,404	19,549	3,789	17,098		1,158
C60	0,000	20,087	41,296	47,574	23,077	18,282	4,423	58,106	37,646	26,702
C45 B	0,000	29,223	11,912	6,603	20,319	14,804	23,256	27,446	14,976	48,820
C18	0,000	18,596	41,221	26,177	6,137	8,336	7,518	28,463	3,087	12,699
C30	0,000	12,812	8,154	19,564	11,058	9,998	15,571	18,904	19,743	12,931

## 9 Resumo da taxa de crescimento (DW) no ensaio C

Este ensaio refere-se ao segundo conjunto de ensaios C.

A Tabela 40 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio C.

A Tabela 41 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio C.

A Tabela 42 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 43 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.

**Tabela 40 - Concentração do peso seco do ensaio C**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#10	0,120	0,090	0,080	0,100	0,140	0,280	0,280	0,600	0,680	1,080
#11	0,120	0,120	0,140	0,230	0,400	0,990	1,100	1,070	1,800	1,730
#12	0,120	0,100	0,140	0,220	0,420	0,880	1,050	0,930	1,040	1,810

**Tabela 41 - Concentração do peso seco após tratamento de dados do ensaio C**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#10	0,120	0,090	0,140	0,225	0,410	0,935	1,075	1,000	1,420	1,770
#11	0,120	0,120	0,140	0,230	0,400	0,990	1,100	1,070	1,800	1,730
#12	0,120	0,100	0,140	0,220	0,420	0,880	1,050	0,930	1,040	1,810

**Tabela 42 - Taxa de crescimento do ensaio C**

$\mu d^{-1}$	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,288	0,442	0,474	0,600	0,412	0,140	-0,072	0,351	0,220
#2	0,000	0,000	0,154	0,496	0,553	0,453	0,105	-0,028	0,520	-0,040
#3	0,000	-0,182	0,336	0,452	0,647	0,370	0,177	-0,121	0,112	0,554

**Tabela 43 - média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio C**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu (d^{-1})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,000	-0,157	0,298	0,474	0,600	0,412	0,141	-0,074	0,328	0,245
dp										
P500C75	0,000	0,146	0,203	0,022	0,047	0,042	0,036	0,047	0,205	0,298

## 10 Produtividade do ensaio C

A Tabela 43 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 44 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.

**Tabela 44 - Resumo da produtividade do ensaio C**

P (g/L d)	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,030	0,050	0,085	0,185	0,263	0,140	-0,075	0,420	0,350
#2	0,000	0,000	0,020	0,090	0,170	0,295	0,110	-0,030	0,730	-0,070
#3	0,000	-0,020	0,040	0,080	0,200	0,230	0,170	-0,120	0,110	0,770

**Tabela 45 - Média e desvio padrão da produtividade do ensaio C.**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (g/L d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,000	-0,017	0,037	0,085	0,185	0,263	0,140	-0,075	0,420	0,350
dp										
P500C75	0,000	0,015	0,015	0,005	0,015	0,033	0,030	0,045	0,310	0,420

## 11 Evolução do consumo diário de nitrato do ensaio C

A Tabela 46 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 47 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio C, após tratamento de dados.

A Tabela 48 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio C.

A Tabela 49 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio C.

**Tabela 46 - Resumo da concentração do nitrato do ensaio C**

NO <sub>3</sub> mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#10	596	581	613	540	514	509	434	408	337	236
#11	597	583	560	563	383	465	289	199	134	41
#12	597	586	658	568	424	485	295	285	291	190

**Tabela 47 - Resumo da concentração de nitrato após o tratamento de dados do ensaio C**

NO <sub>3</sub> mg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#10	596	581	613	540	514	509	434	408	337	236
#11	597	583	560	554	383	465	289	199	134	41
#12	597	586	658	568	424	485	295	285	291	190

**Tabela 48 - Resumo da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio**

ECN mg/Ld	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#10	0,000	15,000	-32,00	73,000	26,000	2,500	75,000	26,000	71,000	101,00
#11	0,000	14,000	23,000	6,000	171,00	-41,00	176,00	90,000	65,000	93,000
#12	0,000	11,000	-72,00	90,000	144,00	-30,50	190,00	10,000	-6,000	101,00

**Tabela 49 - Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato do ensaio C**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
ECN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
'500C75	0,000	13,333	-27,00	56,333	113,67	-23,00	147,00	42,000	43,333	98,333
dp										
'500C75	0,000	2,082	47,697	44,411	77,112	22,699	62,746	42,332	42,829	4,619

## 12 Resumo da taxa de crescimento (DW) no ensaio D

A Tabela 50 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio D.

A Tabela 51 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio D.

A Tabela 52 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio D.

A Tabela 53 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

**Tabela 50 - Concentração do peso seco do ensaio D**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,130	0,080	0,110	0,130	0,090	0,130	0,140	0,100	0,260	0,340
#2	0,130	0,140	0,060	0,130	0,120	0,130	0,120	0,100	0,140	0,190
#3	0,130	0,160	0,040	0,100	0,090	0,070	0,040	0,110	0,180	0,210
#4	0,130	0,140	0,040	0,150	0,090	0,100	0,160	0,140	0,180	0,240
#5	0,130	0,120	0,110	0,170	0,120	0,160	0,230	0,270	0,360	0,440
#6	0,130	0,100	0,050	0,090	0,110	0,080	0,180	0,140	0,170	0,250
#7	0,130	0,170	0,180	0,120	0,090	0,110	0,310	0,350	0,620	0,770
#8	0,130	0,060	0,080	0,090	0,100	0,210	0,200	0,230	0,460	0,500
#9	0,130	0,160	0,120	0,090	0,110	0,170	0,250	0,340	0,440	0,630
#10	0,130	0,070	0,100	0,200	0,360	0,730	0,670	1,350	0,960	2,190
#11	0,130	0,170	0,100	0,200	0,200	0,540	0,390	0,840	1,320	1,030
#12	0,130	0,230	0,170	0,090	0,210	0,630	0,710	0,760	0,980	1,490
#13	0,130	0,160	0,190	0,180	0,240	0,720	0,710	0,920	1,350	1,640
#14	0,130	0,200	0,270	0,300	0,380	0,740	0,930	1,610	2,100	2,330
#15	0,130	0,110	0,080	0,170	0,260	0,580	0,620	1,550	2,190	2,230

**Tabela 51 - Concentração do peso seco do ensaio D após tratamento de dados**

DWg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,130	0,150	0,050	0,130	0,090	0,130	0,140	0,100	0,260	0,340
#2	0,130	0,140	0,060	0,130	0,120	0,130	0,120	0,100	0,140	0,190
#3	0,130	0,160	0,040	0,100	0,090	0,130	0,130	0,110	0,180	0,210
#4	0,130	0,140	0,040	0,150	0,090	0,100	0,160	0,140	0,180	0,240
#5	0,130	0,120	0,110	0,170	0,120	0,160	0,230	0,270	0,360	0,440
#6	0,130	0,100	0,050	0,090	0,110	0,080	0,180	0,140	0,170	0,250
#7	0,130	0,170	0,180	0,120	0,090	0,110	0,310	0,350	0,620	0,770
#8	0,130	0,165	0,080	0,090	0,100	0,210	0,200	0,230	0,460	0,500
#9	0,130	0,160	0,120	0,090	0,110	0,170	0,250	0,340	0,440	0,630
#10	0,130	0,200	0,100	0,200	0,360	0,730	0,670	0,800	0,960	1,260
#11	0,130	0,170	0,100	0,200	0,200	0,540	0,690	0,840	0,970	1,030
#12	0,130	0,230	0,100	0,200	0,210	0,630	0,710	0,760	0,980	1,490
#13	0,130	0,160	0,190	0,235	0,240	0,720	0,710	1,580	2,145	2,280
#14	0,130	0,200	0,270	0,300	0,380	0,740	0,930	1,610	2,100	2,330
#15	0,130	0,110	0,230	0,170	0,260	0,580	0,620	1,550	2,190	2,230

**Tabela 52 - Resumo da taxa de crescimento do ensaio D**

$\mu d^{-1}$	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	0,143	-1,099	0,956	-0,368	0,184	0,074	-0,336	0,956	0,268
#2	0,000	0,074	-0,847	0,773	-0,080	0,040	-0,080	-0,182	0,336	0,305
#3	0,000	0,208	-1,386	0,916	-0,105	0,184	0,000	-0,167	0,492	0,154
#4	0,000	0,074	-1,253	1,322	-0,511	0,053	0,470	-0,134	0,251	0,288
#5	0,000	-0,080	-0,087	0,435	-0,348	0,144	0,363	0,160	0,288	0,201
#6	0,000	-0,262	-0,693	0,588	0,201	-0,159	0,811	-0,251	0,194	0,386
#7	0,000	0,268	0,057	-0,405	-0,288	0,100	1,036	0,121	0,572	0,217
#8	0,000	0,238	-0,724	0,118	0,105	0,371	-0,049	0,140	0,693	0,083
#9	0,000	0,208	-0,288	-0,288	0,201	0,218	0,386	0,307	0,258	0,359
#10	0,000	0,431	-0,693	0,693	0,588	0,353	-0,086	0,177	0,182	0,272
#11	0,000	0,268	-0,531	0,693	0,000	0,497	0,245	0,197	0,144	0,060
#12	0,000	0,571	-0,833	0,693	0,049	0,549	0,120	0,068	0,254	0,419
#13	0,000	0,208	0,172	0,213	0,021	0,549	-0,014	0,800	0,306	0,061
#14	0,000	0,431	0,300	0,105	0,236	0,333	0,229	0,549	0,266	0,104
#15	0,000	-0,167	0,738	-0,302	0,425	0,401	0,067	0,916	0,346	0,018

**Tabela 53 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio D**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu d^{-1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	0,000	0,142	-1,111	0,882	-0,184	0,136	-0,002	-0,229	0,595	0,243
P30C25	0,000	-0,089	-0,678	0,782	-0,219	0,012	0,548	-0,075	0,244	0,291
P30C50	0,000	0,238	-0,318	-0,192	0,006	0,230	0,458	0,190	0,508	0,220
P30C75	0,000	0,423	-0,686	0,693	0,212	0,466	0,093	0,147	0,193	0,250
P500C50	0,000	0,157	0,403	0,005	0,227	0,428	0,094	0,755	0,306	0,061
dp										
P60C25	0,000	0,067	0,270	0,096	0,159	0,083	0,077	0,094	0,322	0,079
P30C25	0,000	0,168	0,583	0,474	0,373	0,155	0,234	0,212	0,047	0,093
P30C50	0,000	0,030	0,391	0,274	0,259	0,136	0,546	0,103	0,225	0,138
P30C75	0,000	0,151	0,151	0,000	0,326	0,101	0,167	0,069	0,056	0,180
P500C50	0,000	0,302	0,297	0,272	0,202	0,110	0,124	0,188	0,040	0,043

### 13 Produtividade do ensaio D

A Tabela 54 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio D.

A Tabela 55 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

**Tabela 54 - Resumo da produtividade do ensaio D**

P (g/L d)	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	0,020	-0,100	0,080	-0,040	0,020	0,010	-0,040	0,160	0,080
#2	0,000	0,010	-0,080	0,070	-0,010	0,005	-0,010	-0,020	0,040	0,050
#3	0,000	0,030	-0,120	0,060	-0,010	0,020	0,000	-0,020	0,070	0,030
#4	0,000	0,010	-0,100	0,110	-0,060	0,005	0,060	-0,020	0,040	0,060
#5	0,000	-0,010	-0,010	0,060	-0,050	0,020	0,070	0,040	0,090	0,080
#6	0,000	-0,030	-0,050	0,040	0,020	-0,015	0,100	-0,040	0,030	0,080
#7	0,000	0,040	0,010	-0,060	-0,030	0,010	0,200	0,040	0,270	0,150
#8	0,000	0,035	-0,085	0,010	0,010	0,055	-0,010	0,030	0,230	0,040
#9	0,000	0,030	-0,040	-0,030	0,020	0,030	0,080	0,090	0,100	0,190
#10	0,000	0,070	-0,100	0,100	0,160	0,185	-0,060	0,130	0,160	0,300
#11	0,000	0,040	-0,070	0,100	0,000	0,170	0,150	0,150	0,130	0,060
#12	0,000	0,100	-0,130	0,100	0,010	0,210	0,080	0,050	0,220	0,510
#13	0,000	0,030	0,030	0,045	0,005	0,240	-0,010	0,870	0,565	0,135
#14	0,000	0,070	0,070	0,030	0,080	0,180	0,190	0,680	0,490	0,230
#15	0,000	-0,020	0,120	-0,060	0,090	0,160	0,040	0,930	0,640	0,040

**Tabela 55 - Média e desvio padrão da produtividade do ensaio D**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (g/L d)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	0,000	0,020	-0,100	0,070	-0,020	0,015	0,000	-0,027	0,090	0,053
P30C25	0,000	-0,010	-0,053	0,070	-0,030	0,003	0,077	-0,007	0,053	0,073
P30C50D	0,000	0,035	-0,038	-0,027	0,000	0,032	0,090	0,053	0,200	0,127
P30C75	0,000	0,070	-0,100	0,100	0,057	0,188	0,057	0,110	0,170	0,290
P500C50	0,000	0,027	0,073	0,005	0,058	0,193	0,073	0,827	0,565	0,135
dp										
P60C25	0,000	0,010	0,020	0,010	0,017	0,009	0,010	0,012	0,062	0,025
P30C25	0,000	0,020	0,045	0,036	0,044	0,018	0,021	0,042	0,032	0,012
P30C50	0,000	0,005	0,048	0,035	0,026	0,023	0,105	0,032	0,089	0,078
P30C75	0,000	0,030	0,030	0,000	0,090	0,020	0,107	0,053	0,046	0,225
P500C50	0,000	0,045	0,045	0,057	0,046	0,042	0,104	0,131	0,075	0,095

## 14 Evolução do consumo diario de nitrato do ensaio D

A Tabela 56 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio D. A Tabela 57 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio D, após tratamento de dados.

A

Tabela 58 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio D. A Tabela 59 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

**Tabela 56 - Resumo da concentração de nitrato do segundo grupo de ensaio D.**

NO3 (mg/L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	d /dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1		546,00	597,00	557,00	521,00	545,00	610,00	553,00	557,00	521,00	495,00
#2		593,00	573,00	518,00	558,00	499,00	546,00	561,00	559,00	532,00	527,00
#3		546,00	589,00	564,00	561,00	427,00	574,00	578,00	571,00	542,00	536,00
#4		593,00	582,00	485,00	564,00	557,00	563,00	563,00	576,00	543,00	587,00
#5		546,00	576,00	574,00	546,00	558,00	523,00	556,00	541,00	492,00	666,00
#6		593,00	535,00	542,00	516,00	563,00	564,00	556,00	552,00	519,00	614,00
#7		546,00	523,00	589,00	533,00	546,00	562,00	499,00	548,00	459,00	397,00
#8		593,00	560,00	574,00	546,00	560,00	539,00	508,00	501,00	423,00	406,00
#9		546,00	581,00	565,00	554,00	551,00	599,00	512,00	466,00	440,00	425,00
#10		593,00	560,00	566,00	530,00	499,00	403,00	329,00	270,00	130,00	58,00
#11		546,00	566,00	548,00	535,00	545,00	465,00	347,00	398,00	220,00	189,00
#12		593,00	544,00	549,00	535,00	523,00	458,00	375,00	396,00	250,00	197,00
#13		546,00	543,00	540,00	526,00	506,00	409,00	324,00	296,00	115,00	37,00
#14		593,00	576,00	537,00	512,00	490,00	346,00	267,00	177,00	39,00	40,00
#15		546,00	467,00	532,00	511,00	479,00	357,00	278,00	170,00	29,00	32,00

**Tabela 57 - Resumo da concentração de nitrato após tratamento de dados do grupo de ensaio D**

NO3 mg/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10	
	d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1		546,00	597,00	557,00	521,00	545,00	610,00	553,00	557,00	521,00	495,00
#2		593,00	573,00	518,00	558,00	499,00	546,00	561,00	559,00	532,00	527,00
#3		546,00	589,00	564,00	561,00	427,00	574,00	578,00	571,00	542,00	536,00
#4		593,00	582,00	485,00	564,00	557,00	563,00	563,00	576,00	543,00	587,00
#5		546,00	576,00	574,00	546,00	558,00	523,00	556,00	541,00	492,00	666,00
#6		593,00	535,00	542,00	516,00	563,00	564,00	556,00	552,00	519,00	614,00
#7		546,00	523,00	589,00	533,00	546,00	562,00	499,00	548,00	459,00	397,00
#8		593,00	560,00	574,00	546,00	560,00	539,00	508,00	501,00	423,00	406,00
#9		546,00	581,00	565,00	554,00	551,00	599,00	512,00	466,00	440,00	425,00
#10		593,00	560,00	566,00	530,00	499,00	403,00	329,00	270,00	130,00	58,00
#11		546,00	566,00	548,00	535,00	545,00	465,00	347,00	398,00	220,00	189,00
#12		593,00	544,00	549,00	535,00	523,00	458,00	375,00	396,00	250,00	197,00
#13		546,00	543,00	540,00	526,00	506,00	409,00	324,00	296,00	115,00	37,00
#14		593,00	576,00	537,00	512,00	490,00	346,00	267,00	177,00	39,00	40,00
#15		546,00	467,00	532,00	511,00	479,00	357,00	278,00	170,00	29,00	32,00

**Tabela 58 - Evolução do consumo de nitrato diário do ensaio D**

ECN (mg/L d)	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9
#1	0,00	-51,00	40,00	36,00	-24,00	-32,50	57,00	-4,00	36,00	26,00
#2	0,00	20,00	55,00	-40,00	59,00	-23,50	-15,00	2,00	27,00	5,00
#3	0,00	-43,00	25,00	3,00	134,00	-73,50	-4,00	7,00	29,00	6,00
#4	0,00	11,00	97,00	-79,00	7,00	-3,00	0,00	-13,00	33,00	-44,00
#5	0,00	-30,00	2,00	28,00	-12,00	17,50	-33,00	15,00	49,00	-174,00
#6	0,00	58,00	-7,00	26,00	-47,00	-0,50	8,00	4,00	33,00	-95,00
#7	0,00	23,00	-66,00	56,00	-13,00	-8,00	63,00	-49,00	89,00	62,00
#8	0,00	33,00	-14,00	28,00	-14,00	10,50	31,00	7,00	78,00	17,00
#9	0,00	-35,00	16,00	11,00	3,00	-24,00	87,00	46,00	26,00	15,00
#10	0,00	33,00	-6,00	36,00	31,00	48,00	74,00	59,00	140,00	72,00
#11	0,00	-20,00	18,00	13,00	-10,00	40,00	118,00	-51,00	178,00	31,00
#12	0,00	49,00	-5,00	14,00	12,00	32,50	83,00	-21,00	146,00	53,00
#13	0,00	3,00	3,00	14,00	20,00	48,50	85,00	28,00	181,00	78,00
#14	0,00	17,00	39,00	25,00	22,00	72,00	79,00	90,00	138,00	-1,00
#15	0,00	79,00	-65,00	21,00	32,00	61,00	79,00	108,00	141,00	-3,00

**Tabela 59 - Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato do ensaio D**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	0,00	-24,67	40,00	-0,33	56,33	-43,17	12,67	1,67	30,67	12,33
P30C25	0,00	13,00	30,67	-8,33	-17,33	4,67	-8,33	2,00	38,33	-104,33
P30C50D	0,00	7,00	-21,33	31,67	-8,00	-7,17	60,33	1,33	64,33	31,33
P30C75	0,00	20,67	2,33	21,00	11,00	40,17	91,67	-4,33	154,67	52,00
P500C50	0,00	33,00	-7,67	20,00	24,67	60,50	81,00	75,33	153,33	24,67
dp										
P60C25	0,00	38,89	15,00	38,11	79,03	26,65	38,79	5,51	4,73	11,85
P30C25	0,00	44,03	57,62	61,21	27,39	11,18	21,73	14,11	9,24	65,50
P30C50	0,00	36,72	41,49	22,72	9,54	17,27	28,10	47,75	33,65	26,58
P30C75	0,00	36,12	13,58	13,00	20,52	7,75	23,25	56,86	20,43	20,52
P500C50	0,00	40,45	52,81	5,57	6,43	11,76	3,46	41,97	24,01	46,20

## 15 Resumo da taxa de crescimento (DW) no ensaio E

A Tabela 60 demonstra a concentração do peso seco (g/L) ao longo do ensaio E.

A Tabela 61 demonstra a concentração do peso seco (g/L), após tratamento de dados ao longo do ensaio E.

A Tabela 62 demonstra a taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) de cada reator diário ao longo do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 63 demonstra a média e o desvio padrão da taxa de crescimento ( $d^{-1}$ ) dos reatores em triplicado do grupo de ensaio E.

**Tabela 60 - Resumo da concentração do peso seco do ensaio E**

DW g/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,120	0,050	0,110	0,180	0,200	0,310	0,510	0,340	0,470	0,630
#2	0,130	0,060	0,090	0,090	0,110	0,210	0,480	0,490	0,580	0,890
#3	0,120	0,010	0,040	0,080	0,100	0,240	0,450	0,420	0,430	0,580
#4	0,120	0,020	0,040	0,060	0,080	0,210	0,300	0,290	0,210	0,300
#5	0,130	0,020	0,040	0,120	0,200	0,190	0,270	0,220	0,260	0,210
#6	0,120	0,020	0,040	0,080	0,080	0,200	0,280	0,260	0,260	0,260
#7	0,120	0,030	0,040	0,060	0,070	0,180	0,330	0,330	0,380	0,570
#8	0,130	0,030	0,040	0,100	0,120	0,190	0,290	0,320	0,390	0,230
#9	0,120	0,090	0,040	0,070	0,110	0,200	0,410	0,530	0,540	0,710
#10	0,120	0,050	0,040	0,190	0,210	0,430	1,020	0,850	1,280	1,210
#11	0,130	0,050	0,040	0,180	0,200	0,440	0,510	-0,090	0,550	0,750
#12	0,120	0,020	0,040	0,210	0,240	0,440	0,720	0,700	0,670	0,940
#13	0,120	0,030	0,040	0,210	0,260	0,490	0,660	0,930	0,730	1,020
#14	0,130	0,030	0,040	0,110	0,180	0,390	0,550	0,870	1,130	1,660
#15	0,120	0,020	0,040	0,120	0,150	0,260	0,720	0,640	0,850	1,340

**Tabela 61 - Concentração do peso seco após o tratamento de dados do ensaio E**

DW g/L	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,120	0,050	0,110	0,180	0,200	0,310	0,510	0,340	0,470	0,630
#2	0,130	0,060	0,090	0,090	0,110	0,210	0,480	0,490	0,580	0,890
#3	0,120	0,010	0,040	0,080	0,100	0,240	0,450	0,420	0,430	0,580
#4	0,120	0,020	0,030	0,060	0,080	0,210	0,300	0,290	0,210	0,300
#5	0,130	0,020	0,070	0,120	0,200	0,205	0,270	0,220	0,260	0,210
#6	0,120	0,020	0,130	0,090	0,140	0,200	0,280	0,260	0,260	0,260
#7	0,120	0,030	0,020	0,060	0,070	0,180	0,330	0,425	0,465	0,570
#8	0,130	0,030	0,080	0,100	0,120	0,190	0,290	0,320	0,390	0,640
#9	0,120	0,090	0,020	0,070	0,110	0,200	0,410	0,530	0,540	0,710
#10	0,120	0,050	0,040	0,190	0,210	0,430	0,615	0,850	0,610	1,210
#11	0,130	0,050	0,040	0,180	0,200	0,440	0,510	0,775	0,550	0,750
#12	0,120	0,050	0,040	0,210	0,240	0,440	0,720	0,700	0,670	0,940
#13	0,120	0,030	0,040	0,115	0,260	0,490	0,660	0,930	0,730	1,020
#14	0,130	0,030	0,040	0,110	0,180	0,390	0,550	0,870	1,130	1,660
#15	0,120	0,020	0,040	0,120	0,150	0,260	0,720	0,900	0,850	1,340

**Tabela 62 - Taxa de crescimento do ensaio E**

$\mu(d^{-1})$	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,875	0,788	0,492	0,105	0,219	0,498	-0,405	0,324	0,293
#2	0,000	-0,773	0,405	0,000	0,201	0,323	0,827	0,021	0,169	0,428
#3	0,000	-2,485	1,386	0,693	0,223	0,438	0,629	-0,069	0,024	0,299
#4	0,000	-1,792	0,405	0,693	0,288	0,483	0,357	-0,034	-0,323	0,357
#5	0,000	-1,872	1,253	0,539	0,511	0,012	0,275	-0,205	0,167	-0,214
#6	0,000	-1,792	1,872	-0,368	0,442	0,178	0,336	-0,074	0,000	0,000
#7	0,000	-1,386	-0,405	1,099	0,154	0,472	0,606	0,253	0,090	0,204
#8	0,000	-1,466	0,981	0,223	0,182	0,230	0,423	0,098	0,198	0,495
#9	0,000	-0,288	-1,504	1,253	0,452	0,299	0,718	0,257	0,019	0,274
#10	0,000	-0,875	-0,223	1,558	0,100	0,358	0,358	0,324	-0,332	0,685
#11	0,000	-0,956	-0,223	1,504	0,105	0,394	0,148	0,418	-0,343	0,310
#12	0,000	-0,875	-0,223	1,658	0,134	0,303	0,492	-0,028	-0,044	0,339
#13	0,000	-1,386	0,288	1,056	0,816	0,317	0,298	0,343	-0,242	0,335
#14	0,000	-1,466	0,288	1,012	0,492	0,387	0,344	0,459	0,261	0,385
#15	0,000	-1,792	0,693	1,099	0,223	0,275	1,019	0,223	-0,057	0,455

**Tabela 63 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento do ensaio E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu d^{-1}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	0,000	-1,378	0,860	0,395	0,176	0,327	0,651	-0,151	0,172	0,340
P60C50	0,000	-1,818	1,177	0,288	0,413	0,224	0,323	-0,104	-0,052	0,048
P30C50	0,000	-1,047	-0,310	0,858	0,263	0,334	0,582	0,203	0,102	0,324
C45 E	0,000	-0,902	-0,223	1,573	0,113	0,352	0,333	0,238	-0,240	0,445
P500C2 5	0,000	-1,548	0,423	1,055	0,510	0,326	0,553	0,342	-0,013	0,391
dp										
P60C75	0,000	0,960	0,494	0,357	0,063	0,109	0,166	0,225	0,150	0,076
P60C50	0,000	0,046	0,736	0,573	0,114	0,238	0,042	0,089	0,249	0,288
P30C50	0,000	0,659	1,245	0,555	0,164	0,125	0,149	0,090	0,090	0,152
C45E	0,000	0,046	0,000	0,078	0,018	0,046	0,174	0,235	0,170	0,209
P500C2 5	0,000	0,215	0,234	0,044	0,297	0,056	0,404	0,118	0,255	0,061

## 16 Produtividade do ensaio E

A Tabela 64 demonstra a produtividade diária de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio D.

A Tabela 65 demonstra a média e o desvio padrão da produtividade diária dos reatores em triplicado do grupo de ensaio D.

**Tabela 64 - Resumo da produtividade do ensaio E**

P(g/L.d	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
d										
c/dados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,000	-0,070	0,060	0,070	0,020	0,055	0,200	-0,170	0,130	0,160
#2	0,000	-0,070	0,030	0,000	0,020	0,050	0,270	0,010	0,090	0,310
#3	0,000	-0,110	0,030	0,040	0,020	0,070	0,210	-0,030	0,010	0,150
#4	0,000	-0,100	0,010	0,030	0,020	0,065	0,090	-0,010	-0,080	0,090
#5	0,000	-0,110	0,050	0,050	0,080	0,003	0,065	-0,050	0,040	-0,050
#6	0,000	-0,100	0,110	-0,040	0,050	0,030	0,080	-0,020	0,000	0,000
#7	0,000	-0,090	-0,010	0,040	0,010	0,055	0,150	0,095	0,040	0,105
#8	0,000	-0,100	0,050	0,020	0,020	0,035	0,100	0,030	0,070	0,250
#9	0,000	-0,030	-0,070	0,050	0,040	0,045	0,210	0,120	0,010	0,170
#10	0,000	-0,070	-0,010	0,150	0,020	0,110	0,180	0,240	-0,240	0,600
#11	0,000	-0,080	-0,010	0,140	0,020	0,120	0,070	0,265	-0,225	0,200
#12	0,000	-0,070	-0,010	0,170	0,030	0,100	0,280	-0,020	-0,030	0,270
#13	0,000	-0,090	0,010	0,285	-0,065	0,115	0,170	0,270	-0,200	0,290
#14	0,000	-0,100	0,010	0,070	0,070	0,105	0,160	0,320	0,260	0,530
#15	0,000	-0,100	0,020	0,080	0,030	0,055	0,460	0,180	-0,050	0,490

**Tabela 65 - Média e desvio padrão da produtividade do ensaio E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (gL-1d-1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	0,000	-0,083	0,040	0,037	0,020	0,058	0,227	-0,063	0,077	0,207
P60C50	0,000	-0,103	0,057	0,013	0,050	0,033	0,078	-0,027	-0,013	0,013
P30C50E	0,000	-0,073	-0,010	0,037	0,023	0,045	0,153	0,082	0,040	0,175
C45	0,000	-0,073	-0,010	0,153	0,023	0,110	0,177	0,162	-0,165	0,357
P500C25	0,000	-0,097	0,013	0,145	0,012	0,092	0,263	0,257	0,003	0,437
dp										
P60C75	0,000	0,023	0,017	0,035	0,000	0,010	0,038	0,095	0,061	0,090
P60C50	0,000	0,006	0,050	0,047	0,030	0,031	0,013	0,021	0,061	0,071
P30C50	0,000	0,038	0,060	0,015	0,015	0,010	0,055	0,046	0,030	0,073
C45	0,000	0,006	0,000	0,015	0,006	0,010	0,105	0,158	0,117	0,214
P500C25	0,000	0,006	0,006	0,121	0,069	0,032	0,170	0,071	0,235	0,129

## 17 Consumo específico de nitrato do ensaio E.

A Tabela 66 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 67 demonstra a concentração (mg/L) de nitrato de cada PBR ao longo do primeiro grupo de ensaio E, após tratamento de dados.

A Tabela 68 demonstra a evolução do consumo diário de cada reator do primeiro grupo de ensaio E.

A Tabela 69 demonstra a média e o desvio padrão da evolução do consumo diário dos reatores em triplicado do grupo de ensaio E.

**Tabela 66 - Concentração de nitrato do ensaio E**

NO3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NO4										
d /dados	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	561,00	568,00	559,00	539,00	535,00	488,00	435,00	214,00	390,00	271,00
#2	535,00	562,00	583,00	549,00	532,00	539,00	484,00	435,00	413,00	256,00
#3	561,00	539,00	570,00	552,00	544,00	544,00	479,00	452,00	417,00	308,00
#4	535,00	565,00	704,00	704,00	548,00	580,00	561,00	565,00	581,00	444,00
#5	561,00	560,00	656,00	656,00	534,00	549,00	535,00	535,00	580,00	438,00
#6	535,00	560,00	645,00	645,00	559,00	540,00	548,00	547,00	545,00	472,00
#7	561,00	580,00	704,00	704,00	564,00	560,00	518,00	496,00	490,00	364,00
#8	535,00	580,00	656,00	656,00	523,00	533,00	502,00	489,00	447,00	336,00
#9	561,00	580,00	645,00	645,00	552,00	541,00	477,00	451,00	407,00	262,00
#10	535,00	583,00	704,00	704,00	519,00	451,00	300,00	299,00	240,00	128,00
#11	561,00	577,00	656,00	656,00	509,00	455,00	364,00	329,00	267,00	133,00
#12	535,00	573,00	645,00	645,00	510,00	434,00	323,00	291,00	269,00	171,00
#13	561,00	582,00	704,00	704,00	494,00	429,00	342,00	322,00	277,00	145,00
#14	535,00	582,00	656,00	656,00	532,00	485,00	388,00	318,00	259,00	212,00
#15	561,00	584,00	645,00	645,00	559,00	533,00	372,00	356,00	281,00	95,00

**Tabela 67 - Concentração de nitrato do ensaio E após tratamento de dados**

NO3m g/L d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	561,00	568,00	559,00	539,00	535,00	488,00	481,50	443,50	390,00	271,00
#2	535,00	562,00	583,00	549,00	532,00	539,00	484,00	435,00	413,00	256,00
#3	561,00	539,00	570,00	552,00	544,00	544,00	479,00	452,00	417,00	308,00
#4	535,00	565,00	704,00	704,00	548,00	544,50	541,50	541,00	581,00	444,00
#5	561,00	560,00	656,00	656,00	534,00	549,00	535,00	535,00	580,00	438,00
#6	535,00	560,00	645,00	645,00	559,00	540,00	548,00	547,00	545,00	472,00
#7	561,00	580,00	650,50	650,50	564,00	560,00	518,00	496,00	490,00	364,00
#8	535,00	580,00	656,00	656,00	523,00	533,00	502,00	489,00	447,00	336,00
#9	561,00	580,00	645,00	645,00	552,00	541,00	477,00	451,00	407,00	262,00
#10	535,00	583,00	704,00	704,00	519,00	451,00	300,00	299,00	240,00	128,00
#11	561,00	577,00	656,00	656,00	509,00	455,00	364,00	329,00	267,00	133,00
#12	535,00	573,00	645,00	645,00	510,00	434,00	323,00	291,00	269,00	171,00
#13	561,00	582,00	650,50	650,50	494,00	429,00	342,00	322,00	277,00	145,00
#14	535,00	582,00	656,00	656,00	532,00	485,00	388,00	318,00	259,00	212,00
#15	561,00	584,00	645,00	645,00	559,00	533,00	372,00	356,00	281,00	95,00

**Tabela 68 - Evolução do consumo diário de nitrato do ensaio E**

ECN (mg/L d) d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
#1	0,00	-7,00	9,00	20,00	4,00	23,50	6,50	38,00	53,50	119,00
#2	0,00	-27,00	-21,00	34,00	17,00	-3,50	55,00	49,00	22,00	157,00
#3	0,00	22,00	-31,00	18,00	8,00	0,00	65,00	27,00	35,00	109,00
#4	0,00	-30,00	-139,00	0,00	156,00	1,75	3,00	0,50	-40,00	137,00
#5	0,00	1,00	-96,00	0,00	122,00	-7,50	14,00	0,00	-45,00	142,00
#6	0,00	-25,00	-85,00	0,00	86,00	9,50	-8,00	1,00	2,00	73,00
#7	0,00	-19,00	-70,50	0,00	86,50	2,00	42,00	22,00	6,00	126,00
#8	0,00	-45,00	-76,00	0,00	133,00	-5,00	31,00	13,00	42,00	111,00
#9	0,00	-19,00	-65,00	0,00	93,00	5,50	64,00	26,00	44,00	145,00
#10	0,00	-48,00	-121,00	0,00	185,00	34,00	151,00	1,00	59,00	112,00
#11	0,00	-16,00	-79,00	0,00	147,00	27,00	91,00	35,00	62,00	134,00
#12	0,00	-38,00	-72,00	0,00	135,00	38,00	111,00	32,00	22,00	98,00
#13	0,00	-21,00	-68,50	0,00	156,50	32,50	87,00	20,00	45,00	132,00
#14	0,00	-47,00	-74,00	0,00	124,00	23,50	97,00	70,00	59,00	47,00
#15	0,00	-23,00	-61,00	0,00	86,00	13,00	161,00	16,00	75,00	186,00

**Tabela 69 - Média e desvio padrão da evolução do consumo diário de nitrato do ensaio E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	0,00	-4,00	-14,33	24,00	9,67	6,67	42,17	38,00	36,83	128,33
P60C50	0,00	-18,00	-	0,00	121,33	1,25	3,00	0,50	-27,67	117,33
P30C50E	0,00	-27,67	-70,50	0,00	104,17	0,83	45,67	20,33	30,67	127,33
C45E	0,00	-34,00	-90,67	0,00	155,67	33,00	117,67	22,67	47,67	114,67
P500C25	0,00	-30,33	-67,83	0,00	122,17	23,00	115,00	35,33	59,67	121,67
dp										
P60C75	0,00	24,64	20,82	8,72	6,66	14,68	31,29	11,00	15,83	25,32
P60C50	0,00	16,64	28,54	0,00	35,00	8,51	11,00	0,50	25,81	38,48
P30C50	0,00	15,01	5,50	0,00	25,18	5,35	16,80	6,66	21,39	17,04
C45B	0,00	16,37	26,50	0,00	26,10	5,57	30,55	18,82	22,28	18,15
P500C25	0,00	14,47	6,53	0,00	35,29	9,76	40,15	30,09	15,01	70,07

## 18 Resultados dos ensaios A e B

A Tabela 70 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos ensaios A e B.

A Tabela 71 representa os resultados da média e o desvio padrão da produtividade dos ensaios A e B.

A Tabela 72 representa os resultados da média e o desvio padrão da evolução do consumo específico de nitrato dos ensaios A e B.

**Tabela 70 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados A e B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu$ d-1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,154	0,146	0,894	0,782	0,418	0,136			
C75	0,000	0,155	0,147	0,558	0,565	0,466	0,257	0,353		
C30A	0,000	-0,057	-0,214	0,241	0,140	0,330	0,388	0,138	0,362	0,297
C5	0,000	-0,096	-0,500	0,152	0,171	-0,010	0,242	0,145	0,104	0,008
C0	0,000	-0,230	-0,388	0,105	-0,229	0,067	0,093	0,016	0,209	-0,081
C113	0,000	-0,567	0,590	0,796	0,697	0,636	0,271	0,216		
C60	0,000	-0,019	0,190	0,663	0,476	0,477	0,224	0,174	0,346	
C45B	0,000	-0,341	0,378	0,281	0,510	0,588	0,181	0,621	0,427	-0,256
C18	0,000	-0,910	0,618	0,277	0,460	0,353	0,049	0,299	0,374	0,133
C30B	0,000	-0,541	0,631	0,144	0,343	0,209	0,372	0,282	0,292	0,228
dp										
C150	0,000	0,022	0,156	0,340	0,149	0,101	0,100			
C75	0,000	0,100	0,141	0,203	0,062	0,046	0,074	0,053		
C30	0,000	0,082	0,234	0,085	0,171	0,013	0,064	0,165	0,074	0,007
C5	0,000	0,199	0,273	0,340	0,573	0,355	0,200	0,011	0,029	0,122
C0	0,000	0,088	0,048	0,265	0,292	0,048	0,178	0,101	0,183	0,057
C113	0,000	0,083	0,088	0,200	0,402	0,010	0,227	0,090		
C60	0,000	0,017	0,104	0,318	0,259	0,145	0,322	0,066		
C45B	0,000	0,383	0,423	0,194	0,371	0,015	0,062	0,333	0,203	0,272
C18	0,000	0,348	0,188	0,116	0,478	0,044	0,049	0,006	0,008	0,028
C30	0,000	0,391	0,450	0,107	0,197	0,146	0,524	0,149	0,127	0,107

**Tabela 71 - Média e desvio padrão a produtividade dos resultados A e B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (gL-1d-1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,020	0,023	0,255	0,470	0,563	0,317			
C75	0,000	0,021	0,022	0,126	0,221	0,386	0,386	0,689		
C30A	0,000	-0,006	-0,019	0,025	0,016	0,063	0,125	0,055	0,190	0,206
C5	0,000	-0,010	-0,041	0,008	0,031	-0,010	0,025	0,018	0,014	0,003
C0	0,000	-0,024	-0,031	0,008	-0,015	0,005	0,005	0,002	0,016	-0,007
C113	0,000	-0,054	0,057	0,157	0,291	0,736	0,602			
C60	0,000	-0,002	0,026	0,152	0,164	0,401	0,238	0,279		
C45B	0,000	-0,031	0,036	0,045	0,123	0,336	0,178	0,913	1,114	-0,648
C18	0,000	-0,072	0,045	0,032	0,066	0,099	0,021	0,144	0,253	0,115
C30B	0,000	-0,048	0,063	0,022	0,063	0,062	0,151	0,155	0,230	0,213
dp										
C150	0,000	0,003	0,018	0,140	0,090	0,109	0,268			
C75	0,000	0,014	0,020	0,056	0,061	0,057	0,162	0,038		
C30	0,000	0,009	0,023	0,007	0,019	0,008	0,037	0,064	0,026	0,016
C5	0,000	0,022	0,020	0,020	0,073	0,042	0,021	0,004	0,002	0,017
C0	0,000	0,008	0,004	0,019	0,020	0,004	0,011	0,008	0,014	0,005
C113	0,000	0,006	0,023	0,051	0,175	0,142	0,450			
C60	0,000	0,002	0,015	0,107	0,062	0,211	0,364	0,084		
C45B	0,000	0,038	0,044	0,035	0,091	0,126	0,044	0,340	0,573	0,633
C18	0,000	0,017	0,022	0,019	0,060	0,010	0,021	0,013	0,012	0,019
C30	0,000	0,027	0,038	0,018	0,031	0,047	0,216	0,065	0,126	0,083

**Tabela 72 - Média e desvio padrão da evolução do consumo de nitrato dos resultados A e B**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,00	24,13	76,58	79,96	158,89	117,72	-11,91	48,48	0,00	0,00
C75	0,00	10,50	34,05	62,61	70,09	111,77	140,52	22,12	40,31	0,00
C30A	0,00	5,41	23,51	27,90	8,34	7,91	26,03	23,99	29,26	58,18
C5	0,00	0,00	22,10	11,23	-2,04	-1,28	-48,49	40,32	-20,41	-16,33
C0	0,00	-13,75	27,70	11,57	-4,08	2,47	-26,37	41,68	-57,33	-47,29
C113	0,00	25,86	58,78	85,46	85,46	157,48	7,23	-26,71		-5,58
C60	0,00	27,20	73,75	31,47	72,53	69,38	87,19	75,70	28,95	57,59
C45 B	0,00	29,60	29,18	30,57	53,48	62,95	113,73	24,50	111,29	31,90
C18	0,00	-3,08	20,33	48,37	11,51	7,83	33,94	-8,34	51,18	47,38
C30B	0,00	46,95	70,97	59,43	21,10	10,58	41,03	13,27	35,30	53,73
dp										
C150	0,00	19,13	5,62	28,70	23,37	27,31	7,38	11,20	0,00	0,00
C75	0,00	13,79	10,31	16,60	12,92	16,43	37,99	63,35	11,20	0,00
C30	0,00	13,62	4,68	2,36	4,57	6,03	9,70	7,02	33,02	30,67
C5	0,00	0,00	13,58	5,10	0,00	0,25	15,82	18,88	37,77	11,23
C0	0,00	13,76	21,29	9,26	7,15	5,69	35,74	33,48	32,84	31,63
C113	0,00	8,52	39,65	43,81	50,40	19,55	3,79	17,10		1,16
C60	0,00	20,09	41,30	47,57	23,08	18,28	4,42	58,11	37,65	26,70
C45 B	0,00	29,22	11,91	6,60	20,32	14,80	23,26	27,45	14,98	48,82
C18	0,00	18,60	41,22	26,18	6,14	8,34	7,52	28,46	3,09	12,70
C30	0,00	12,81	8,15	19,56	11,06	10,00	15,57	18,90	19,74	12,93

## 19 Resultados dos ensaios C, D e E

A Tabela 73 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos ensaios C, D e E.

A Tabela 74 representa os resultados da média e o desvio padrão da produtividade dos ensaios C, D e E.

A Tabela 75 representa os resultados da média e o desvio padrão da evolução do consumo de nitrato dos ensaios C, D e E.

**Tabela 73 Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados C, D e E.**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu d-1)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,000	-0,157	0,298	0,474	0,600	0,412	0,141	-0,074	0,328	0,245
P60C25	0,000	0,142	-1,111	0,882	-0,184	0,136	-0,002	-0,229	0,595	0,243
P30C25	0,000	-0,089	-0,678	0,782	-0,219	0,012	0,548	-0,075	0,244	0,291
P30C50D	0,000	0,238	-0,318	-0,192	0,006	0,230	0,458	0,190	0,508	0,220
P30C75	0,000	0,423	-0,686	0,693	0,212	0,466	0,093	0,147	0,193	0,250
P500C50	0,000	0,157	0,403	0,005	0,227	0,428	0,094	0,755	0,306	0,061
P60C75	0,000	-1,378	0,860	0,395	0,176	0,327	0,651	-0,151	0,172	0,340
P60C50	0,000	-1,818	1,177	0,288	0,413	0,224	0,323	-0,104	-0,052	0,048
P30C50E	0,000	-1,047	-0,310	0,858	0,263	0,334	0,582	0,203	0,102	0,324
C45 E	0,000	-0,902	-0,223	1,573	0,113	0,352	0,333	0,238	-0,240	0,445
P500C25	0,000	-1,548	0,423	1,055	0,510	0,326	0,553	0,342	-0,013	0,391
dp										
P500C75	0,000	0,146	0,203	0,022	0,047	0,042	0,036	0,047	0,205	0,298
P60C25	0,000	0,067	0,270	0,096	0,159	0,083	0,077	0,094	0,322	0,079
P30C25	0,000	0,168	0,583	0,474	0,373	0,155	0,234	0,212	0,047	0,093
P30C50D	0,000	0,030	0,391	0,274	0,259	0,136	0,546	0,103	0,225	0,138
P30C75	0,000	0,151	0,151	0,000	0,326	0,101	0,167	0,069	0,056	0,180
P500C50	0,000	0,302	0,297	0,272	0,202	0,110	0,124	0,188	0,040	0,043
P60C75	0,000	0,960	0,494	0,357	0,063	0,109	0,166	0,225	0,150	0,076
P60C50	0,000	0,046	0,736	0,573	0,114	0,238	0,042	0,089	0,249	0,288
P30C50E	0,000	0,659	1,245	0,555	0,164	0,125	0,149	0,090	0,090	0,152
C45E	0,000	0,046	0,000	0,078	0,018	0,046	0,174	0,235	0,170	0,209
P500C25	0,000	0,215	0,234	0,044	0,297	0,056	0,404	0,118	0,255	0,061

**Tabela 74 Média e desvio padrão da produtividade dos resultados C, D e E.**

Média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P (gL-1d-1)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,000	-0,017	0,037	0,085	0,185	0,263	0,140	-0,075	0,420	0,350
P60C25	0,000	0,020	-0,100	0,070	-0,020	0,015	0,000	-0,027	0,090	0,053
P30C25	0,000	-0,010	-0,053	0,070	-0,030	0,003	0,077	-0,007	0,053	0,073
P30C50D	0,000	0,035	-0,038	-0,027	0,000	0,032	0,090	0,053	0,200	0,127
P30C75	0,000	0,070	-0,100	0,100	0,057	0,188	0,057	0,110	0,170	0,290
P500C50	0,000	0,027	0,073	0,005	0,058	0,193	0,073	0,827	0,565	0,135
P60C75	0,000	-0,083	0,040	0,037	0,020	0,058	0,227	-0,063	0,077	0,207
P60C50	0,000	-0,103	0,057	0,013	0,050	0,033	0,078	-0,027	-0,013	0,013
P30C50E	0,000	-0,073	-0,010	0,037	0,023	0,045	0,153	0,082	0,040	0,175
C45	0,000	-0,073	-0,010	0,153	0,023	0,110	0,177	0,162	-0,043	0,235
P500C25	0,000	-0,097	0,013	0,145	0,012	0,092	0,263	0,257	0,003	0,437
dp										
P500C75	0,000	0,015	0,015	0,005	0,015	0,033	0,030	0,045	0,310	0,420
P60C25	0,000	0,010	0,020	0,010	0,017	0,009	0,010	0,012	0,062	0,025
P30C25	0,000	0,020	0,045	0,036	0,044	0,018	0,021	0,042	0,032	0,012
P30C50	0,000	0,005	0,048	0,035	0,026	0,023	0,105	0,032	0,089	0,078
P30C75	0,000	0,030	0,030	0,000	0,090	0,020	0,107	0,053	0,046	0,225
P500C50	0,000	0,045	0,045	0,057	0,046	0,042	0,104	0,131	0,075	0,095
P60C75	0,000	0,023	0,017	0,035	0,000	0,010	0,038	0,095	0,061	0,090
P60C50	0,000	0,006	0,050	0,047	0,030	0,031	0,013	0,021	0,061	0,071
P30C50	0,000	0,038	0,060	0,015	0,015	0,010	0,055	0,046	0,030	0,073
C45	0,000	0,006	0,000	0,015	0,006	0,010	0,105	0,158	0,175	0,035
P500C25	0,000	0,006	0,006	0,121	0,069	0,032	0,170	0,071	0,235	0,129

**Tabela 75 Média e desvio padrão do consumo de nitrato dos resultados C, D e E.**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
CSN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,00	13,33	-27,00	56,33	113,67	-23,00	147,00	42,00	43,33	98,33
P60C25	0,00	-24,67	40,00	-0,33	56,33	-43,17	12,67	1,67	30,67	12,33
P30C25	0,00	13,00	30,67	-8,33	-17,33	4,67	-8,33	2,00	38,33	- 104,33
P30C50D	0,00	7,00	-21,33	31,67	-8,00	-7,17	60,33	1,33	64,33	31,33
P30C75	0,00	20,67	2,33	21,00	11,00	40,17	91,67	-4,33	154,67	52,00
P500C50	0,00	33,00	-7,67	20,00	24,67	60,50	81,00	75,33	153,33	24,67
P60C75	0,00	-4,00	-14,33	24,00	9,67	6,67	42,17	38,00	36,83	128,33
P60C50	0,00	-18,00	- 106,67	0,00	121,33	1,25	3,00	0,50	-27,67	117,33
P30C50E	0,00	-27,67	-70,50	0,00	104,17	0,83	45,67	20,33	30,67	127,33
C45E	0,00	-34,00	-90,67	0,00	155,67	33,00	117,67	22,67	47,67	114,67
P500C25	0,00	-30,33	-67,83	0,00	122,17	23,00	115,00	35,33	59,67	121,67
dp										
P500C75	0,00	2,08	47,70	44,41	77,11	22,70	62,75	42,33	42,83	4,62
P60C25	0,00	38,89	15,00	38,11	79,03	26,65	38,79	5,51	4,73	11,85
P30C25	0,00	44,03	57,62	61,21	27,39	11,18	21,73	14,11	9,24	65,50
P30C50	0,00	36,72	41,49	22,72	9,54	17,27	28,10	47,75	33,65	26,58
P30C75	0,00	36,12	13,58	13,00	20,52	7,75	23,25	56,86	20,43	20,52
P500C50	0,00	40,45	52,81	5,57	6,43	11,76	3,46	41,97	24,01	46,20
P60C75	0,00	24,64	20,82	8,72	6,66	14,68	31,29	11,00	15,83	25,33
P60C50	0,00	16,64	28,54	0,00	35,01	8,51	11,00	0,50	25,81	38,48
P30C50	0,00	15,01	5,50	0,00	25,18	5,35	16,80	6,66	21,39	17,04
C45B	0,00	16,37	26,50	0,00	26,10	5,57	30,55	18,82	22,28	18,15
P500C25	0,00	14,47	6,53	0,00	35,29	9,76	40,15	30,09	15,01	70,07

## 20 Resultados dos ensaios A, B, C, D e E.

A Tabela 76 representa os resultados da média e o desvio padrão da taxa de crescimento dos ensaios. A, B, C, D e E.

A Tabela 77 representa os resultados da média e o desvio padrão da produtividade dos ensaios A, B, C, D e E.

A Tabela 78 representa os resultados da média e o desvio padrão do consumo específico de nitrato dos ensaios A, B, C, D e E.

**Tabela 76 - Média e desvio padrão da taxa de crescimento dos resultados A, B, C, D e E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
$\mu d-1)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,154	0,146	0,894	0,782	0,418	0,136			
C75	0,000	0,155	0,147	0,558	0,565	0,466	0,257	0,353		
C30A	0,000	-0,057	-0,214	0,241	0,140	0,330	0,388	0,138	0,362	0,297
C5	0,000	-0,096	-0,500	0,152	0,171	-0,010	0,242	0,145	0,104	0,008
C0	0,000	-0,230	-0,388	0,105	-0,229	0,067	0,093	0,016	0,209	-0,081
C113	0,000	-0,567	0,590	0,796	0,697	0,636	0,271	0,216		
C60	0,000	-0,019	0,190	0,663	0,476	0,477	0,224	0,174	0,346	
C45B	0,000	-0,341	0,378	0,281	0,510	0,588	0,181	0,621	0,427	-0,256
C18	0,000	-0,910	0,618	0,277	0,460	0,353	0,049	0,299	0,374	0,133
C30B	0,000	-0,541	0,631	0,144	0,343	0,209	0,372	0,282	0,292	0,228
P500C75	0,000	-0,157	0,298	0,474	0,600	0,412	0,141	-0,074	0,328	0,245
P60C25	0,000	0,142	-1,111	0,882	-0,184	0,136	-0,002	-0,229	0,595	0,243
P30C25	0,000	-0,089	-0,678	0,782	-0,219	0,012	0,548	-0,075	0,244	0,291
P30C50	0,000	0,238	-0,318	-0,192	0,006	0,230	0,458	0,190	0,508	0,220
P30C75	0,000	0,423	-0,686	0,693	0,212	0,466	0,093	0,147	0,193	0,250
P500C50	0,000	0,157	0,403	0,005	0,227	0,428	0,094	0,755	0,306	0,061
P60C75	0,000	-1,378	0,860	0,395	0,176	0,327	0,651	-0,151	0,172	0,340
P60C50	0,000	-1,818	1,177	0,288	0,413	0,224	0,323	-0,104	-0,052	0,048
P30C50	0,000	-1,047	-0,310	0,858	0,263	0,334	0,582	0,203	0,102	0,324
C45 E	0,000	-0,902	-0,223	1,573	0,113	0,352	0,333	0,238	-0,240	0,445
P500C25	0,000	-1,548	0,423	1,055	0,510	0,326	0,553	0,342	-0,013	0,391
dp										
C150	0,000	0,021	0,156	0,340	0,149	0,101	0,100			
C75	0,000	0,100	0,141	0,203	0,062	0,046	0,074	0,053		
C30	0,000	0,082	0,234	0,085	0,171	0,013	0,064	0,165	0,074	0,007
C5	0,000	0,199	0,273	0,340	0,573	0,355	0,200	0,011	0,029	0,122
C0	0,000	0,088	0,048	0,265	0,292	0,048	0,178	0,101	0,183	0,057
C113	0,000	0,083	0,088	0,200	0,402	0,010	0,227	0,090		
C60	0,000	0,017	0,104	0,318	0,259	0,145	0,322	0,066		
C45B	0,000	0,383	0,423	0,194	0,371	0,015	0,062	0,333	0,203	0,272
C18	0,000	0,348	0,188	0,116	0,478	0,044	0,049	0,006	0,008	0,028
C30	0,000	0,391	0,450	0,107	0,197	0,146	0,524	0,149	0,127	0,107
P500C75	0,000	0,146	0,203	0,022	0,047	0,042	0,036	0,047	0,205	0,298
P60C25	0,000	0,067	0,270	0,096	0,159	0,083	0,077	0,094	0,322	0,079
P30C25	0,000	0,168	0,583	0,474	0,373	0,155	0,234	0,212	0,047	0,093
P30C50	0,000	0,030	0,391	0,274	0,259	0,136	0,546	0,103	0,225	0,138
P30C75	0,000	0,151	0,151	0,000	0,326	0,101	0,167	0,069	0,056	0,180
P500C50	0,000	0,302	0,297	0,272	0,202	0,110	0,124	0,188	0,040	0,043
P60C75	0,000	0,960	0,494	0,357	0,063	0,109	0,166	0,225	0,150	0,076
P60C50	0,000	0,046	0,736	0,573	0,114	0,238	0,042	0,089	0,249	0,288
P30C50	0,000	0,659	1,245	0,555	0,164	0,125	0,149	0,090	0,090	0,152
C45E	0,000	0,046	0,000	0,078	0,018	0,046	0,174	0,235	0,170	0,209
P500C25	0,000	0,215	0,234	0,044	0,297	0,056	0,404	0,118	0,255	0,061

**Tabela 77 - Média e desvio padrão da produtividade dos resultados A, B, C, D e E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,000	0,020	0,023	0,255	0,470	0,563	0,317			
C75	0,000	0,021	0,022	0,126	0,221	0,386	0,386	0,689		
C30A	0,000	-0,006	-0,019	0,025	0,016	0,063	0,125	0,055	0,190	0,206
C5	0,000	-0,010	-0,041	0,008	0,031	-0,010	0,025	0,018	0,014	0,003
C0	0,000	-0,024	-0,031	0,008	-0,015	0,005	0,005	0,002	0,016	-0,007
C113	0,000	-0,054	0,057	0,157	0,291	0,736	0,602			
C60	0,000	-0,002	0,026	0,152	0,164	0,401	0,238	0,279		
C45B	0,000	-0,031	0,036	0,045	0,123	0,336	0,178	0,913	1,114	-0,648
C18	0,000	-0,072	0,045	0,032	0,066	0,099	0,021	0,144	0,253	0,115
C30B	0,000	-0,048	0,063	0,022	0,063	0,062	0,151	0,155	0,230	0,213
P500C75	0,000	-0,017	0,037	0,085	0,185	0,263	0,140	-0,075	0,420	0,350
P60C25	0,000	0,020	-0,100	0,070	-0,020	0,015	0,000	-0,027	0,090	0,053
P30C25	0,000	-0,010	-0,053	0,070	-0,030	0,003	0,077	-0,007	0,053	0,073
P30C50D	0,000	0,035	-0,038	-0,027	0,000	0,032	0,090	0,053	0,200	0,127
P30C75	0,000	0,070	-0,100	0,100	0,057	0,188	0,057	0,110	0,170	0,290
P500C50	0,000	0,027	0,073	0,005	0,058	0,193	0,073	0,827	0,565	0,135
P60C75	0,000	-0,083	0,040	0,037	0,020	0,058	0,227	-0,063	0,077	0,207
P60C50	0,000	-0,103	0,057	0,013	0,050	0,033	0,078	-0,027	-0,013	0,013
P30C50E	0,000	-0,073	-0,010	0,037	0,023	0,045	0,153	0,082	0,040	0,175
C45	0,000	-0,073	-0,010	0,153	0,023	0,110	0,177	0,162	-0,043	0,235
P500C25	0,000	-0,097	0,013	0,145	0,012	0,092	0,263	0,257	0,003	0,437
dp										
C150	0,000	0,003	0,018	0,140	0,090	0,109	0,268			
C75	0,000	0,014	0,020	0,056	0,061	0,057	0,162	0,038		
C30	0,000	0,009	0,023	0,007	0,019	0,008	0,037	0,064	0,026	0,016
C5	0,000	0,022	0,020	0,020	0,073	0,042	0,021	0,004	0,002	0,017
C0	0,000	0,008	0,004	0,019	0,020	0,004	0,011	0,008	0,014	0,005
C113	0,000	0,006	0,023	0,051	0,175	0,142	0,450			
C60	0,000	0,002	0,015	0,107	0,062	0,211	0,364	0,084		
C45B	0,000	0,038	0,044	0,035	0,091	0,126	0,044	0,340	0,573	0,633
C18	0,000	0,017	0,022	0,019	0,060	0,010	0,021	0,013	0,012	0,019
C30	0,000	0,027	0,038	0,018	0,031	0,047	0,216	0,065	0,126	0,083
P500C75	0,000	0,015	0,015	0,005	0,015	0,033	0,030	0,045	0,310	0,420
P60C25	0,000	0,010	0,020	0,010	0,017	0,009	0,010	0,012	0,062	0,025
P30C25	0,000	0,020	0,045	0,036	0,044	0,018	0,021	0,042	0,032	0,012
P30C50	0,000	0,005	0,048	0,035	0,026	0,023	0,105	0,032	0,089	0,078
P30C75	0,000	0,030	0,030	0,000	0,090	0,020	0,107	0,053	0,046	0,225
P500C50	0,000	0,045	0,045	0,057	0,046	0,042	0,104	0,131	0,075	0,095
P60C75	0,000	0,023	0,017	0,035	0,000	0,010	0,038	0,095	0,061	0,090
P60C50	0,000	0,006	0,050	0,047	0,030	0,031	0,013	0,021	0,061	0,071
P30C50	0,000	0,038	0,060	0,015	0,015	0,010	0,055	0,046	0,030	0,073
C45	0,000	0,006	0,000	0,015	0,006	0,010	0,105	0,158	0,175	0,035
P500C25	0,000	0,006	0,006	0,121	0,069	0,032	0,170	0,071	0,235	0,129

**Tabela 78 - Evolução do consumo diário de nitrato dos resultados A, B, C, D e E**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
ECN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,00	24,13	76,58	79,96	158,89	117,72	-11,91	48,48	0,00	0,00
C75	0,00	10,50	34,05	62,61	70,09	111,77	140,52	22,12	40,31	0,00
C30A	0,00	5,41	23,51	27,90	8,34	7,91	26,03	23,99	29,26	58,18
C5	0,00	0,00	22,10	11,23	-2,04	-1,28	-48,49	40,32	-20,41	-16,33
C0	0,00	-13,75	27,70	11,57	-4,08	2,47	-26,37	41,68	-57,33	-47,29
C113	0,00	25,86	58,78	85,46	85,46	157,48	7,23	-26,71		-5,58
C60	0,00	27,20	73,75	31,47	72,53	69,38	87,19	75,70	28,95	57,59
C45 B	0,00	29,60	29,18	30,57	53,48	62,95	113,73	24,50	111,29	31,90
C18	0,00	-3,08	20,33	48,37	11,51	7,83	33,94	-8,34	51,18	47,38
C30B	0,00	46,95	70,97	59,43	21,10	10,58	41,03	13,27	35,30	53,73
P500C75	0,00	13,33	-27,00	56,33	113,67	-23,00	147,00	42,00	43,33	98,33
P60C25	0,00	-24,67	40,00	-0,33	56,33	-43,17	12,67	1,67	30,67	12,33
P30C25	0,00	13,00	30,67	-8,33	-17,33	4,67	-8,33	2,00	38,33	-104,33
P30C50D	0,00	7,00	-21,33	31,67	-8,00	-7,17	60,33	1,33	64,33	31,33
P30C75	0,00	20,67	2,33	21,00	11,00	40,17	91,67	-4,33	154,67	52,00
P500C50	0,00	33,00	-7,67	20,00	24,67	60,50	81,00	75,33	153,33	24,67
P60C75	0,00	-4,00	-14,33	24,00	9,67	6,67	42,17	38,00	36,83	128,33
P60C50	0,00	-18,00	-106,67	0,00	121,33	1,25	3,00	0,50	-27,67	117,33
P30C50E	0,00	-27,67	-70,50	0,00	104,17	0,83	45,67	20,33	30,67	127,33
C45E	0,00	-34,00	-90,67	0,00	155,67	33,00	117,67	22,67	47,67	114,67
P500C25	0,00	-30,33	-67,83	0,00	122,17	23,00	115,00	35,33	59,67	121,67
dp										
C150	0,00	19,13	5,62	28,70	23,37	27,31	7,38	11,20	0,00	0,00
C75	0,00	13,79	10,31	16,60	12,92	16,43	37,99	63,35	11,20	0,00
C30	0,00	13,62	4,68	2,36	4,57	6,03	9,70	7,02	33,02	30,67
C5	0,00	0,00	13,58	5,10	0,00	0,25	15,82	18,88	37,77	11,23
C0	0,00	13,76	21,29	9,26	7,15	5,69	35,74	33,48	32,84	31,63
C113	0,00	8,52	39,65	43,81	50,40	19,55	3,79	17,10		1,16
C60	0,00	20,09	41,30	47,57	23,08	18,28	4,42	58,11	37,65	26,70
C45 B	0,00	29,22	11,91	6,60	20,32	14,80	23,26	27,45	14,98	48,82
C18	0,00	18,60	41,22	26,18	6,14	8,34	7,52	28,46	3,09	12,70
C30	0,00	12,81	8,15	19,56	11,06	10,00	15,57	18,90	19,74	12,93
P500C75	0,00	2,08	47,70	44,41	77,11	22,70	62,75	42,33	42,83	4,62
P60C25	0,00	38,89	15,00	38,11	79,03	26,65	38,79	5,51	4,73	11,85
P30C25	0,00	44,03	57,62	61,21	27,39	11,18	21,73	14,11	9,24	65,50
P30C50	0,00	36,72	41,49	22,72	9,54	17,27	28,10	47,75	33,65	26,58
P30C75	0,00	36,12	13,58	13,00	20,52	7,75	23,25	56,86	20,43	20,52
P500C50	0,00	40,45	52,81	5,57	6,43	11,76	3,46	41,97	24,01	46,20
P60C75	0,00	24,64	20,82	8,72	6,66	14,68	31,29	11,00	15,83	25,32
P60C50	0,00	16,64	28,54	0,00	35,00	8,51	11,00	0,50	25,81	38,48
P30C50	0,00	15,01	5,50	0,00	25,18	5,35	16,80	6,66	21,39	17,04
C45B	0,00	16,37	26,50	0,00	26,10	5,57	30,55	18,82	22,28	18,15
P500C25	0,00	14,47	6,53	0,00	35,29	9,76	40,15	30,09	15,01	70,07

## 21 Pigmento do primeiro ensaio A

Descreve as leituras das Absorvância no respectivo dia 28-03 e 07-04 através das Equações 6, 7 e 8 obtém-se as concentrações dos pigmentos Clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), Clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e Carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de absorvência a 480, 649 e 665 nm.

A Tabela 79 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio A. A Tabela 80 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio A.

A Tabela 81 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio A. A Tabela 82 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio A.

A Tabela 83 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio A. A Tabela 84 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio A.

$$C_{Ca} = 12.19 \cdot A_{665} - 3.45 \cdot A_{649} \quad (6)$$

$$C_{Cb} = 21.99 \cdot A_{649} - 5.32 \cdot A_{665} \quad (7)$$

$$C_{Car} = \frac{1000 \cdot A_{480} - 2.14 \cdot C_{Ca} - 70.16 \cdot C_{Cb}}{220} \quad (8)$$

**Tabela 79 - Resumo do pigmento clorofila-a do ensaio A**

Cca (mg/L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	1,500							28,300		
#2	1,520							35,900		
#3	1,500							39,600		
#4	1,520							51,000		
#5	1,500							39,400		
#6	1,520							49,600		
#7	1,500									59,100
#8	1,520									63,300
#9	1,500									58,600
#10	1,520									49,800
#11	1,500									35,000
#12	1,520									37,500
#13	1,500									20,300
#14	1,520									28,300
#15	1,500									17,600

**Tabela 80 Média e desvio padrão do pigmento clorofila-a no ensaio A**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	1,507							34,600		
C75	1,513							46,667		
C30A	1,507									60,333
C5	1,513									40,767
C0	1,507									22,067
dp										
C150	0,012							5,761		
C75	0,012							6,332		
C30	0,012									2,581
C5	0,012									7,922
C0	0,012									5,564

**Tabela 81 Resumo do pigmento clorofila b do ensaio A**

Ccb (mg/L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	0,720							10,700		
#2	0,730							14,500		
#3	0,720							15,600		
#4	0,730							20,100		
#5	0,720							15,700		
#6	0,730							19,200		
#7	0,720									24,000
#8	0,730									25,200
#9	0,720									25,100
#10	0,730									23,800
#11	0,720									17,900
#12	0,730									18,400
#13	0,720									10,500
#14	0,730									15,000
#15	0,720									9,200

**Tabela 82 Média e desvio padrão do pigmento clorofila b no ensaio A**

média	1	21	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,723							13,600		
C75	0,727							18,333		
C30	0,723									24,767
C5	0,727									20,033
C0	0,723									11,567
dp										
C150	0,006							2,571		
C75	0,006							2,325		
C30	0,006									0,666
C5	0,006									3,272
C0	0,006									3,044

**Tabela 83 - Resumo do pigmento carotenóide do ensaio A**

Cca (mg/L)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	0,420							10,300		
#2	0,420							13,100		
#3	0,420							15,600		
#4	0,420							14,400		
#5	0,420							10,100		
#6	0,420							13,600		
#7	0,420									13,900
#8	0,420									15,100
#9	0,420									13,500
#10	0,420									13,400
#11	0,420									9,200
#12	0,420									9,700
#13	0,420									5,500
#14	0,420									7,400
#15	0,420									4,700

**Tabela 84 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide do ensaio A**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C150	0,420							13,000		
C75	0,420							12,700		
C30	0,420									14,167
C5	0,420									10,767
C0	0,420									5,867
dp										
C150	0,000							2,651		
C75	0,000							2,287		
C30	0,000									0,833
C5	0,000									2,294
C0	0,000									1,387

## 22 Pigmento do primeiro ensaio B

Descreve as leituras das Absorvância no respectivo dia 18-04 e 28-04 através das Equações 6, 7 e 8 obtém-se as concentrações dos pigmentos Clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), Clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e Carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de absorvência a 480, 649 e 665 nm.

A Tabela 85 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio B. A Tabela 86 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio B.

A Tabela 87 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio B. A Tabela 88 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio B.

A Tabela 89 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio B. A Tabela 90 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio B.

**Tabela 85 Resumo do pigmento clorofila-a do ensaio B**

Cca mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	2,300									0,500
#2	2,380									0,900
#3	2,300									1,100
#4	2,380									1,400
#5	2,300									1,300
#6	2,380									1,500
#7	2,300									54,000
#8	2,380									67,200
#9	2,300									82,700
#10	2,380									27,400
#11	2,300									26,400
#12	2,380									15,400
#13	2,300									31,500
#14	2,380									27,400
#15	2,300									22,400

**Tabela 86 Média e desvio padrão do pigmento clorofila-a no ensaio B**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	2,327									0,833
C60	2,353									1,400
C45	2,327									67,967
C18	2,353									23,067
C30	2,327									27,100
dp										
C113	0,046									0,306
C60	0,046									0,100
C45	0,046									14,365
C18	0,046									6,658
C30	0,046									4,557

**Tabela 87 Resumo do pigmento clorofila b do ensaio B**

Ccb mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	1,040									0,800
#2	1,110									1,500
#3	1,040									1,800
#4	1,110									2,400
#5	1,040									2,500
#6	1,110									3,100
#7	1,040									18,800
#8	1,110									23,800
#9	1,040									31,000
#10	1,110									9,500
#11	1,040									9,900
#12	1,110									-6,700
#13	1,040									10,600
#14	1,110									9,400
#15	1,040									7,100

**Tabela 88 Média e desvio padrão do pigmento clorofila b no ensaio B**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	1,063									1,367
C60	1,087									2,667
C45B	1,063									24,533
C18	1,087									4,233
C30	1,063									9,033
dv										
C113	0,040									0,513
C60	0,040									0,379
C45	0,040									6,133
C18	0,040									9,471
C30	0,040									1,779

**Tabela 89 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio B**

Ccar mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	0,540									-0,070
#2	0,560									-0,100
#3	0,540									-0,100
#4	0,560									-0,060
#5	0,540									-0,080
#6	0,560									-0,070
#7	0,540									12,860
#8	0,560									17,110
#9	0,540									22,350
#10	0,560									6,680
#11	0,540									6,320
#12	0,560									7,070
#13	0,540									7,760
#14	0,560									6,780
#15	0,540									5,600

**Tabela 90 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide do ensaio B**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C113	0,547									-0,090
C60	0,553									-0,070
C45	0,547									17,440
C18	0,553									6,690
C30	0,547									6,713
dp										
C113	0,012									0,017
C60	0,012									0,010
C45	0,012									4,754
C18	0,012									0,375
C30	0,012									1,082

## 23 Pigmento do segundo grupo de ensaio D.

Descreve as leituras das Absorvância no respectivo dia 06-06 e 16-06 através das Equações 6, 7 e 8 obtém-se as concentrações dos pigmentos Clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), Clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e Carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de absorvência a 480, 649 e 665 nm.

A Tabela 91 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio D. A Tabela 92 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio D.

A Tabela 93 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio B. A Tabela 94 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio D.

A Tabela 95 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio B. A Tabela 96 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio D.

**Tabela 91 Resumo do pigmento clorofila-a do ensaio D.**

Cca mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dados	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	3,940									3,920
#2	4,140									3,960
#3	3,940									3,960
#4	4,140									4,080
#5	3,940									7,860
#6	4,140									4,810
#7	3,940									11,640
#8	4,140									12,200
#9	3,940									9,840
#10	4,140									30,350
#11	3,940									33,560
#12	4,140									29,270
#13	3,940									40,360
#14	4,140									38,380
#15	3,940									37,260

**Tabela 92 Média e desvio padrão do pigmento clorofila-a no ensaio D**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	4,007									3,947
P30C25	4,073									5,583
P30C50	4,007									11,227
P30C75	4,073									31,060
P500C50	4,007									38,667
dp										
P60C25	0,115									0,023
P30C25	0,115									2,005
P30C50	0,115									1,233
P30C75	0,115									2,231
P500C50	0,115									1,570

**Tabela 93 Resumo do pigmento clorofila b do ensaio D.**

Ccb mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	1,720									1,570
#2	1,820									1,600
#3	1,720									1,600
#4	1,820									1,720
#5	1,720									2,810
#6	1,820									1,910
#7	1,720									3,910
#8	1,820									4,610
#9	1,720									3,320
#10	1,820									14,870
#11	1,720									13,900
#12	1,820									12,600
#13	1,720									19,510
#14	1,820									17,800
#15	1,720									16,920

**Tabela 94 Média e desvio padrão do pigmento clorofila b no ensaio D.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	1,753									1,590
P30C25	1,787									2,147
P30C50	1,753									3,947
P30C75	1,787									13,790
P500C50	1,753									18,077
dv										
P60C25	0,058									0,017
P30C25	0,058									0,582
P30C50	0,058									0,646
P30C75	0,058									1,139
P500C50	0,058									1,317

**Tabela 95 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio D**

Ccar mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	0,840									1,370
#2	0,880									1,290
#3	0,840									1,290
#4	0,880									1,600
#5	0,840									2,540
#6	0,880									1,790
#7	0,840									3,470
#8	0,880									3,520
#9	0,840									3,040
#10	0,880									7,580
#11	0,840									8,150
#12	0,880									7,210
#13	0,840									9,620
#14	0,880									9,890
#15	0,840									9,630

**Tabela 96 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio D**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C25	0,853									1,317
P30C25	0,867									1,977
P30C50	0,853									3,343
P30C75	0,867									7,647
P500C50	0,853									9,713
dp										
P60C25	0,023									0,046
P30C25	0,023									0,497
P30C50	0,023									0,264
P30C75	0,023									0,474
P500C50	0,023									0,153

## 24 Pigmento do segundo grupo de ensaio E

Descreve as leituras das Absorvância no respectivo dia 06-06 e 16-06 através das Equações 6, 7 e 8 obtém-se as concentrações dos pigmentos Clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), Clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e Carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de absorvência a 480, 649 e 665 nm.

A Tabela 97 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio E. A Tabela 98 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio E.

A Tabela 99 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio E. A Tabela 100 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio E.

A Tabela 101 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio E. A Tabela 102 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio E.

**Tabela 97 Resumo do pigmento clorofila-a do ensaio E.**

Cca mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dados	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	3,110									11,180
#2	3,120									12,820
#3	3,110									11,490
#4	3,120									5,130
#5	3,110									4,860
#6	3,120									3,240
#7	3,110									7,970
#8	3,120									4,990
#9	3,110									13,440
#10	3,120									20,540
#11	3,110									14,790
#12	3,120									18,360
#13	3,110									20,870
#14	3,120									28,530
#15	3,110									27,590

**Tabela 98 Média e desvio padrão do pigmento clorofila-a no ensaio E.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	3,113									11,830
P60C50	3,117									4,410
P30C50	3,113									8,800
C45	3,117									17,897
P500C25	3,113									25,663
dp										
P60C75	0,006									0,871
P60C50	0,006									1,022
P30C50	0,006									4,286
C45	0,006									2,903
P500C25	0,006									4,178

**Tabela 99 Resumo do pigmento clorofila b do ensaio E.**

Ccb mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	1,330									3,320
#2	1,320									4,440
#3	1,330									4,200
#4	1,320									2,060
#5	1,330									1,560
#6	1,320									1,040
#7	1,330									2,050
#8	1,320									1,510
#9	1,330									4,780
#10	1,320									8,040
#11	1,330									5,630
#12	1,320									6,740
#13	1,330									8,100
#14	1,320									10,700
#15	1,330									10,900

**Tabela 100 Média e desvio padrão do pigmento clorofila b no ensaio E.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	1,327									3,987
P60C50	1,323									1,553
P30C50	1,327									2,780
C45	1,323									6,803
P500C25	1,327									9,900
dp										
P60C75	0,006									0,590
P60C50	0,006									0,510
P30C50	0,006									1,753
C45	0,006									1,206
P500C25	0,006									1,562

**Tabela 101 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio E.**

Cca rmg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dados	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#1	0,680									3,060
#2	0,680									3,590
#3	0,680									3,180
#4	0,680									1,560
#5	0,680									1,640
#6	0,680									1,270
#7	0,680									2,540
#8	0,680									1,650
#9	0,680									3,710

#10	0,680	5,370
#11	0,680	4,150
#12	0,680	4,900
#13	0,680	5,530
#14	0,680	7,170
#15	0,680	7,030

**Tabela 102 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio E.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P60C75	0,680									3,277
P60C50	0,680									1,490
P30C50	0,680									2,633
C45	0,680									4,807
P500C25	0,680									6,577
dp										
P60C75	0,000									0,278
P60C50	0,000									0,195
P30C50	0,000									1,033
C45	0,000									0,615
P500C25	0,000									0,909

## **25 Pigmento dos resultados do primeiro experimento dos ensaios A e B**

A Tabela 103 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) da clorofila-*a* do ensaio A e B. A Tabela 104 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) da clorofila-*b* do ensaio A e B. A Tabela 105 demonstra o resumo da média e desvio padrão da concentração (mg/L) do carotenóide do ensaio A e B.

**Tabela 103 Resumo da média e desvio padrão da clorofila-a dos ensaios A e B**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	1,507							34,600		
C75	1,513							46,667		
C30A	1,507									60,333
C5	1,513									40,767
C0	1,507									22,067
C113	2,327									0,833
C60	2,353									1,400
C45B	2,327									67,967
C18	2,353									23,067
C30B	2,327									27,100
dp										
C150	0,012							5,761		
C75	0,012							6,332		
C30	0,012									2,581
C5	0,012									7,922
C0	0,012									5,564
C113	0,046									0,306
C60	0,046									0,100
C45	0,046									14,365
C18	0,046									6,658
C30	0,046									4,557

**Tabela 104 Resumo da média e desvio padrão da clorofila b dos ensaios A e B.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	0,723							13,600		
C75	0,727							18,333		
C30A	0,723									24,767
C5	0,727									20,033
C0	0,723									11,567
C113	1,063									1,367
C60	1,087									2,667
C45B	1,063									24,533
C18	1,087									4,233
C30B	1,063									9,033
dp										
C150	0,006							2,571		
C75	0,006							2,325		
C30	0,006									0,666
C5	0,006									3,272
C0	0,006									3,044
C113	0,040									0,513
C60	0,040									0,379
C45	0,040									6,133
C18	0,040									9,471
C30	0,040									1,779

**Tabela 105 Resumo da média e desvio padrão do carotenoíde dos ensaios A e B.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	0,420							13,000		
C75	0,420							12,700		
C30A	0,420									14,167
C5	0,420									10,767
C0	0,420									5,867
C113	0,547									-0,090
C60	0,553									-0,070
C45B	0,547									17,440
C18	0,553									6,690
C30B	0,547									6,713
dp										
C150	0,000							2,651		
C75	0,000							2,287		
C30	0,000									0,833
C5	0,000									2,294
C0	0,000									1,387
C113	0,012									0,017
C60	0,012									0,010
C45	0,012									4,754
C18	0,012									0,375
C30	0,012									1,082

## 26 Pigmento do segundo grupo de ensaio C

Descreve as leituras das Absorvância no respectivo dia 09-05 e 19-05 através das Equações 6, 7 e 8 obtém-se as concentrações dos pigmentos Clorofila-*a* ( $C_{Ca}$ ), Clorofila-*b* ( $C_{Cb}$ ) e Carotenóides totais ( $C_{Car}$ ) foram determinadas por medição espectrofotométrica de absorvência a 480, 649 e 665 nm.

A Tabela 106 demonstra o perfil da concentração (mg/L) do pigmento clorofila-*a* do ensaio C. A Tabela 107 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*a* do ensaio C.

A Tabela 108 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento clorofila-*b* do ensaio C. A Tabela 109 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento clorofila-*b* do ensaio C.

A Tabela 110 demonstra a concentração (mg/L) do perfil do pigmento carotenóide do ensaio C. A Tabela 111 demonstra a média e desvio padrão da concentração (mg/L) do perfil pigmento carotenóide do ensaio C.

**Tabela 106 Resumo do pigmento clorofila-a do ensaio C**

Cca mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#10	1,610									33,640
#11	1,540									75,740
#12	1,610									47,240

**Tabela 107 Média e desvio padrão do pigmento clorofila-a no ensaio C**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	1,587									52,207
dp										
P500C75	0,040									21,485

**Tabela 108 Resumo do pigmento clorofila b do ensaio C**

Ccb mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#10	0,790									12,730
#11	0,740									30,000
#12	0,790									19,280

**Tabela 109 Média e desvio padrão do pigmento clorofila b no ensaio C.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,773									20,670
dv										
P500C75	0,029									8,719

**Tabela 110 Resumo do pigmento carotenóide do ensaio C.**

Ccar mg/L	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d c/dado	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
#10	0,400									8,580
#11	0,390									18,250
#12	0,400									12,320

**Tabela 111 Média e desvio padrão do pigmento carotenóide no ensaio C.**

média	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P500C75	0,397									13,050
dp										
P500C75	0,006									4,876

## 27 Pigmento dos resultados do segundo experimento dos ensaios C, D e E

A

Tabela 112 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*a* do ensaio C, D e E. A Tabela 113 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*b* do ensaio C, D e E.

A Tabela 114 demonstra o resumo da média e desvio padrão do carotenóide do ensaio C, D e E.

**Tabela 112 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila-*a* dos ensaios C, D e E**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P500C75	1,587									52,207
P60C25	4,007									3,947
P30C25	4,073									5,583
P30C50D	4,007									11,227
P30C75	4,073									31,060
P500C50	4,007									38,667
P60C75	3,113									11,830
P60C50	3,117									4,410
P30C50E	3,113									8,800
C45E	3,117									17,897
P500C25	3,11									25,663
dp										
P500C75	0,040									21,485
P60C25	0,115									0,023
P30C25	0,115									2,005
P30C50	0,115									1,233
P30C75	0,115									2,231
P60C75	0,006									0,871
P60C50	0,006									1,022
P30C50	0,006									4,286
C45E	0,006									2,903
P500C25	0,006									4,178

**Tabela 113 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila b dos ensaios C, D e E.**

média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P500C75	0,773									20,670
P60C25	1,753									1,590
P30C25	1,787									2,147
P30C50	1,753									3,947
P30C75	1,787									13,790
P500C50	1,753									18,077
P60C75	1,327									3,987
P60C50	1,323									1,553
P30C50	1,327									2,780
C45	1,323									6,803
P500C25	1,33									9,9
dp										
P500C75	0,029									8,719
P60C25	0,058									0,017
P30C25	0,058									0,582
P30C50	0,058									0,646
P30C75	0,058									1,139
P500C50	0,058									1,317
P60C75	0,006									0,590
P60C50	0,006									0,510
P30C50	0,006									1,753
C45	0,006									1,206
P500C25	0,01									1,56

**Tabela 114 Resumo da média e desvio padrão do carotenoíde dos ensaios C, D e E.**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
P500C75	0,397									13,050
P60C25	0,853									1,317
P30C25	0,867									1,977
P30C50	0,853									3,343
P30C75	0,867									7,647
P500C50	0,853									9,713
P60C75	0,680									3,277
P60C50	0,680									1,490
P30C50	0,680									2,633
C45	0,680									4,807
P500C25	0,68									6,577
dp										
P500C75	0,006									4,876
P60C25	0,023									0,046
P30C25	0,023									0,497
P30C50	0,023									0,264
P30C75	0,023									0,474
P500C50	0,023									0,153
P60C75	0,000									0,278
P60C50	0,000									0,195
P30C50	0,000									1,033
C45	0,000									0,615
P500C25	0,00									0,91

## **28 Pigmento dos resultados dos ensaios A, B, C, D e E**

A Tabela 115 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*a* dos ensaios A, B, C, D e E. A

Tabela 116 demonstra o resumo da média e desvio padrão da clorofila-*b* dos ensaios A, B, C, D e E.

A

Tabela 117 demonstra o resumo da média e desvio padrão do carotenóide dos ensaios A, B, C, D e E.

**Tabela 115 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila-a dos ensaios A, B, C, D e E**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	1,507							34,6		
C75	1,513							46,667		
C30A	1,507									60,333
C5	1,513									40,767
C0	1,507									22,067
C113	2,327									0,833
C60	2,353									1,4
C45B	2,327									67,967
C18	2,353									23,067
C30B	2,327									27,1
P500C75	1,587									52,207
P60C25	4,007									3,947
P30C25	4,073									5,583
P30C50	4,007									11,227
P30C75	4,073									31,06
P500C50	4,007									38,667
D										
P60C75	3,113									11,83
P60C50	3,117									4,41
P30C50E	3,113									8,8
C45E	3,117									17,897
P500C25	3,113									25,663
dp										
C150	0,012							5,761		
C75	0,012							6,332		
C30	0,012									2,581
C5	0,012									7,922
C0	0,012									5,564
C113	0,046									0,306
C60	0,046									0,1
C45	0,046									14,365
C18	0,046									6,658
C30	0,046									4,557
P500C75	0,04									21,485
P60C25	0,115									0,023
P30C25	0,115									2,005
P30C50	0,115									1,233
P30C75	0,115									2,231
P500C50	0,115									1,57
P60C75	0,006									0,871
P60C50	0,006									1,022
P30C50	0,006									4,286
C45	0,006									2,903
P500C25	0,006									4,178

**Tabela 116 Resumo da média e desvio padrão do pigmento clorofila b dos ensaios A, B, C, D e E**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	0,723							13,600		
C75	0,727							18,333		
C30A	0,723									24,767
C5	0,727									20,033
C0	0,723									11,567
C113	1,063									1,367
C60	1,087									2,667
C45B	1,063									24,533
C18	1,087									4,233
C30B	1,063									9,033
P500C75	0,773									20,670
P60C25	1,753									1,590
P30C25	1,787									2,147
P30C50D	1,753									3,947
P30C75	1,787									13,790
P500C50	1,753									18,077
P60C75	1,327									3,987
P60C50	1,323									1,553
P30C50E	1,327									2,780
C45E	1,323									6,803
P500C25	1,327									9,900
dp										
C150	0,006							2,571		
C75	0,006							2,325		
C30	0,006									0,666
C5	0,006									3,272
C0	0,006									3,044
C113	0,040									0,513
C60	0,040									0,379
C45	0,040									6,133
C18	0,040									9,471
C30	0,040									1,779
P500C75	0,029									8,719
P60C25	0,058									0,017
P30C25	0,058									0,582
P30C50	0,058									0,646
P30C75	0,058									1,139
P500C50	0,058									1,317
P60C75	0,006									0,590
P60C50	0,006									0,510
P30C50	0,006									1,753
C45	0,006									1,206
P500C25	0,006									1,562

**Tabela 117 Resumo da média e desvio padrão do carotenoíde dos ensaios A, B, C, D e E**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
média	0	1	2	3	4	6	7	8	9	10
C150	0,420							13,000		
C75	0,420							12,700		
C30A	0,420									14,167
C5	0,420									10,767
C0	0,420									5,867
C113	0,547									-0,090
C60	0,553									-0,070
C45B	0,547									17,440
C18	0,553									6,690
C30B	0,547									6,713
P500C75	0,397									13,050
P60C25	0,853									1,317
P30C25	0,867									1,977
P30C50D	0,853									3,343
P30C75	0,867									7,647
P500C50	0,853									9,713
P60C75	0,680									3,277
P60C50	0,680									1,490
P30C50E	0,680									2,633
45E	0,680									4,807
P500C25	0,680									6,577
dp										
C150	0,000							2,651		
C75	0,000							2,287		
C30	0,000									0,833
C5	0,000									2,294
C0	0,000									1,387
C113	0,012									0,017
C60	0,012									0,010
C45	0,012									4,754
C18	0,012									0,375
C30	0,012									1,082
P500C75	0,006									4,876
P60C25	0,023									0,046
P30C25	0,023									0,497
P30C50	0,023									0,264
P30C75	0,023									0,474
P500C50	0,023									0,153
P60C75	0,000									0,278
P60C50	0,000									0,195
P30C50	0,000									1,033
C45	0,000									0,615
P500C25	0,000									0,909

## Anexo B. Resultados dos testes efetuados

### Curva de Calibração do Nitrato no aparelho DR2800

Curva de absorção do nitrato obtido através de uma faixa de leitura de comprimento de onda eletromagnética (ABS 220 nm), no espectrofotometro DR2800 Lange. Cada concentração da solução foi obtido um valor de absorbâncias correspondente.

Através dos valores da concentração real e suas respectivas Abs 220nm, é possível confeccionar um gráfico da curva de calibração do nitrato representado na Figura 10, referente ao aparelho DR2800. A Equação. 9, define a reta descrita na curva calibração onde a coordenada no eixo X é a Abs 220 lida no aparelho DR2800 e no eixo Y é a concentração dos nitratos.

$$\text{CNO}_3 = 21,844 \times \text{Abs}_{220} - 0,4329 \rightarrow \quad (9)$$

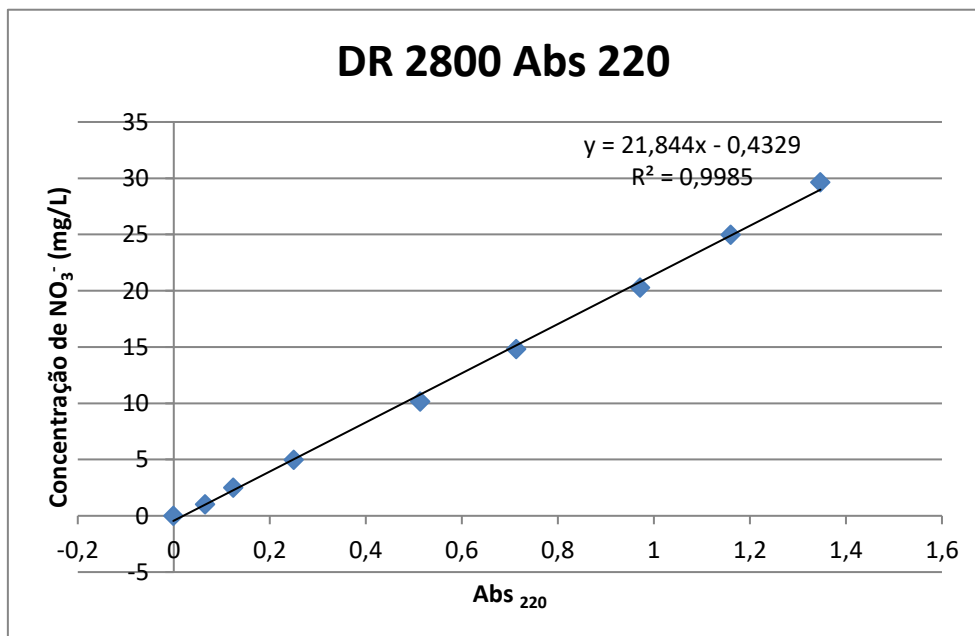


Figura 65 Curva de calibração da Abs220 e concentração do nitrato no aparelho Dr2800

Correlação da absorvância Dr2800 e absorvância do leitor de placas

A Equação 10 refere-se a correlação dos aparelhos, onde a coordenada X é a Abs lida no aparelho DR2800 e o eixo Y é a Abs lida no leitor de placas..

$$Abs\ placa = 0,8918 \times ABS\ DR2800 - 0,0261 \rightarrow \quad (10)$$

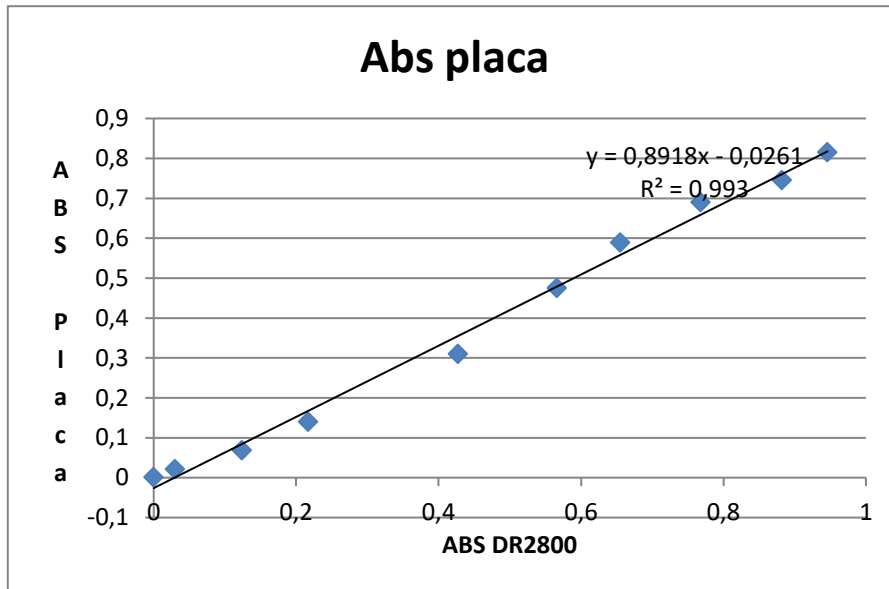


Figura 66 Correlação do Aparelho DR2800 e leitor de placas

## Anexo C. Curva de crescimento

Um dos métodos utilizados para a avaliação do crescimento é a curva de crescimento de uma cultura microalgal, que consiste no aumento da biomassa ou numero de células em função do tempo, como mostra a Figura 67.

Fase de Indução ou Fase de Lag: Esta fase é a fase de adaptação das células ao novo cultivo, não existe aumento significativo e pode ocorrer redução na densidade celular.

Fase Exponencial ou Fase Log: Nesta fase a cultura apresenta uma elevada taxa de crescimento exponencial constante em intervalo de tempo.

Fase de Diminuição do Crescimento Relativo ou Desacelerado. O tempo necessário para a duplicação celular aumenta, reduzindo a taxa de crescimento. Deve-se a diminuição de nutrientes que foram assimilados pelas microalgas na fase anterior, consequentemente a redução da actividade fotossintética ocorrida pelo aumento da densidade microalgal devido ao sombreamento entre as células, o que permite uma quantidade de energia luminosa inferior a disponível na fase exponencial.

Fase Estacionária. Nesta fase não há variação da densidade celular, onde a taxa de crescimento é compensada pela mortalidade celular.

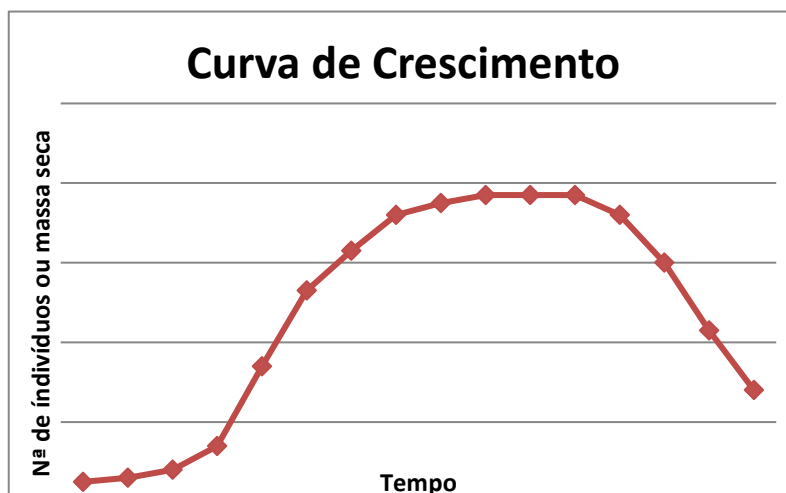


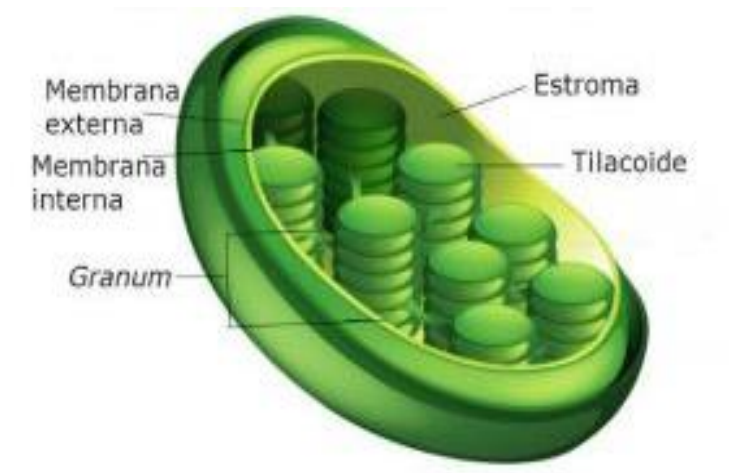
Figura 67 Curva de crescimento de uma cultura microalgal.

As microalgas autotróficas, ou seja, que produzem a energia necessária ao seu metabolismo através da fotossíntese absorvem energia para o metabolismo e crescimento.

A fonte de carbono e azoto, o tipo e a intensidade de luz são os principais factores que podem limitar o crescimento celular fotossintético.

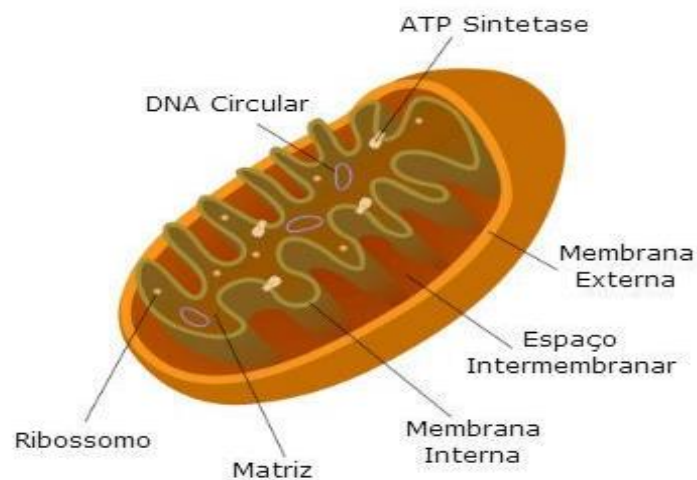
## Anexo D. Fotossíntese

A fotossíntese se dá nos cloroplasto e utiliza a energia luminosa pra converter o CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O em açúcar, liberando O<sub>2</sub> como produto final deste processo. A representação esquemática do cloroplasto, representada na Figura 68.



**Figura 68** Representação esquemática do cloroplasto

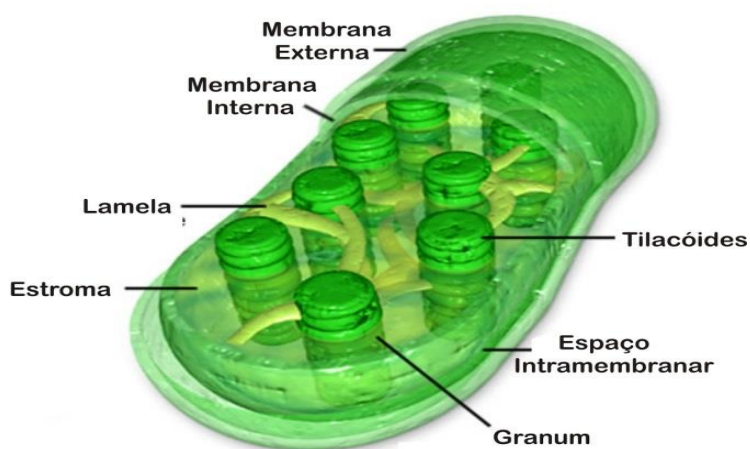
Outro processo metabólico fundamental é a respiração onde ocorre nas mitocôndrias utilizando o açúcar produzido e o oxigênio liberado na fotossíntese em produção de energia sobra à forma de adenosina trifosfato (ATP), representada na Figura 69.



**Figura 69** Representação esquemática da mitocôndria

A fotossíntese pode ser dividida em reações fotoquímicas dependem da luz (reações claras) e bioquímicas não independem da luz (reações escuro) onde fixam o  $\text{CO}_2$  e C e dependem da fixação da energia química utilizadas nas reações fotoquímicas podendo ocorrer tanto na presença de luz como no escuro, enquanto a energia estiver disponível. Estas reações explicam o efeito da luz piscante. As reações bioquímicas conhecidas como Ciclo de Calvin.

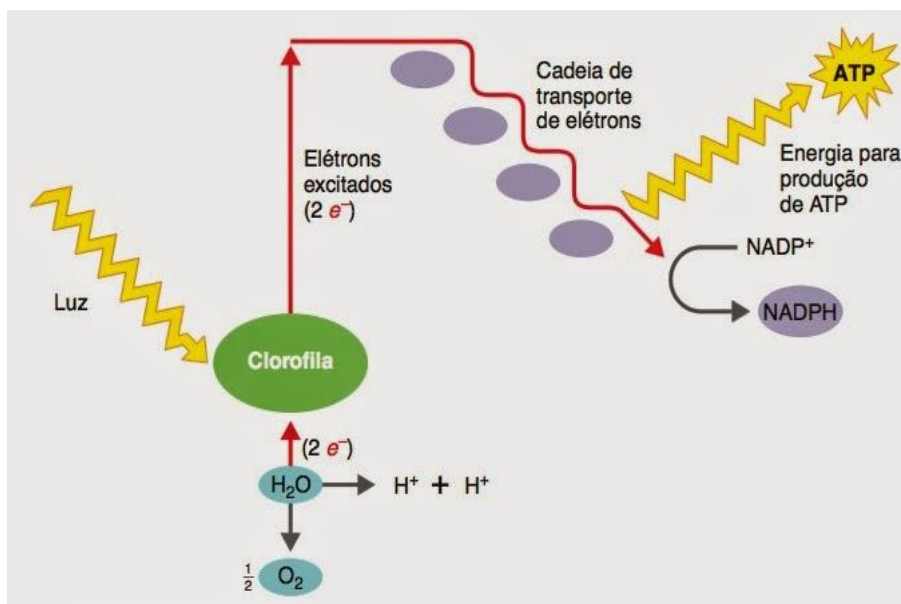
As reações fotoquímicas ocorrem nos tilacoídes e a bioquímica no estroma representado na Figura 70.



**Figura 70** Representação esquemática do tilacoídes

Nestas reações ocorre a conversão da energia luminosa para formação de compostos com alta energia química como a adenosina trifosfato (ATP), a partir da adenosina difosfato (ADP) ou a formação ou redução destas moléculas carregadoras de elétrons o NADPH a partir do fosfato de nicotinamida adenina dinucleotídeo ( $\text{NADP}^+$ ). Nas reações bioquímicas, a adenosina trifosfato e o Fosfato de nicotinamida adenina dinucleotídeo com hidrogênio (ATP e o NADPH) produzido nas reações fotoquímicas são utilizados para redução e ligar o átomo de Carbono do  $\text{CO}_2$  para a síntese do açúcar simples. Assim ambas se conectam pela troca de ATP e ADP e NADPH e  $\text{NADP}^+$ . Ambas as reações bioquímicas como fotoquímicas sessam no escuro, pois a síntese de ADP e  $\text{NADP}^+$  requer de ação luminosa. Na reação fotoquímica estão os pigmentos A e os outros pigmentos como os carotenóide ides e as ficobilinas que são responsáveis pela captura da energia luminosa para promover a transferência de elétrons através da cadeia transportadora para formação ATP e NADPH, onde os dois estão ligados por uma cadeia de transporte de

elétrons que são denominados pela ordem que foram descobertos ou pelo pico de absorção máximo o Foto Sistema 1 ou PSI ou P700 e o Foto Sistema 2 ou PSII ou P680. Ambos os foto sistemas, possuem uma forma especial de clorofila-*a* no centro de reação que tem seu ótimo de absorção em 700 nm para o Sistema 1 e 680 nm para o Sistema 2. A Figura 71 é a representação esquemática do transporte de elétrons na reação fotoquímica.



**Figura 71** Representação esquemática do transporte de elétrons na reação fotoquímica.

Cada foto sistema tem um conjunto de sistema com cerca de 250 a 400 moléculas conhecido como Complexo Antena e o centro de reação. Complexo Antena é formado por pigmentos que coletam e congregam energia luminosa e a direcionam para o centro de reação. O centro de reação formado por um complexo de proteínas e moléculas de clorofila-*a* que possibilita a conversão da energia luminosa em energia química mediante a transferência de elétrons para a molécula receptora. Todos os pigmentos do foto sistema podem absorver fóton, mas somente um par de moléculas de clorofila-*a* existente em cada foto sistema podem utilizar a energia e transferi-la para o processo das reações fotoquímicas.

Quando um fóton de luz é absorvido pela molécula de clorofila, um elétron é promovido para um nível energético superior, este estado é chamado de excitado é instável e rapidamente estabiliza então os elétrons retornam para o estado de energia menor onde a energia liberada pode seguir três destinos:

Ela pode ser transferida para outra molécula do centro de reação, os pigmentos até

atingirem o receptor de elétrons faz parte da cadeia transportadora a quinona A, direcionando a energia para a fotossíntese, denominada de dissipação fotoquímica. A energia também pode ser dissipada ou reemitida como fluorescência da clorofila, ela pode ser dissipada sobre a forma de calor.

O fóton excita a clorofila especializada que se encontram dentro do centro de reação liberando elétron da clorofila que por sua vez são transferidos para uma molécula aceptora.

O processo fotoquímico da fotossíntese ocorre dentro dos cloroplastos estão os tilacóides. Em cada tilacóide existe o PSI o PSII e a ATP sintase, onde estão localizados na membrana do tilacóide. Entre o PSI e o PSII esta a cadeia transportadora de elétrons. No interior do tilacóide a H<sub>2</sub>O e íons de Hidrogênio. A luz atinge o PSII, causando a transferência de elétrons excitados para o receptor primário. Estes elétrons são substituídos por hidrólise de uma molécula de água que libera hidrogênio e oxigênio como produto. Através da membrana, íons de hidrogênio são bombeados pra o interior do tilacóides, com isto elétrons excitados, passam do PSII para o PSI, pela cadeia transportadora. Quando a luz atinge o PSI, os elétrons são transferidos do NADP<sup>+</sup> presente no estroma produzindo assim o NADPH. O ADP+PI com energia fornecida pelo fluxo de íons de hidrogênio para fora do tilacóide é convertido em ATP. Tanto o NADPH quanto o ATP, será utilizado no processo bioquímico da fotossíntese (Ciclo de Calvin), para formação de carboidratos.

Podemos estimar este processo a estimativa de produção primaria quanto a medição da fotossíntese, ou seja, taxa de crescimento do consumo de carbono, da produção de oxigênio ou fluorescência da clorofila-*a*.(Eaula).