

## Resum

A dia d'avui es pot concebre la investigació biotecnològica en el terreny de les microalgues com una via de desenvolupament interessant de cara trobar una alternativa als combustibles fòssils, o en una altra direcció, una font important de substàncies d'interès com ara  $\beta$ -carotens.

Amb l'objectiu de contribuir a aquestes vies de desenvolupament es presenta el disseny i caracterització d'un fotobioreactor de configuració air-lift destinat a la producció de microalgues, com la *chlorella vulgaris*, la producció de la qual serà destinada a la recerca.

Com a concepte bàsic, es planteja un reactor discontinu, d'aproximadament 100L de volum d'operació, dividit de forma general en 5 elements estructurals principals. Dos tubs concèntrics fabricats en vidre borosilicat, un d'exterior anomenat downcomer i un d'interior de menor diàmetre denominat genèricament com a riser.

Aquest últim element és suportat de la tapa superior, fabricada en acer Inoxidable 360L en la qual es mecanitzen sis ports de sortida cap a l'exterior del sistema. En un d'aquests ports tindrà lloc l'entrada del component gasos. Aquest flux de gas es introduït al sistema per mitjà d'un difusor de disc ceràmic ubicat sota el riser, generant un bombolleig ascendent que impulsa el fluid de cultiu fins a la part superior d'aquest on el gas serà expulsat a l'ambient en el desgasificador. El flux de corrent generat en forma de loop fa innecessari la utilització de cap tipus de mecanisme d'agitació mecànica.

En referència a la part inferior, es mecanitza un tapa també en acer inoxidable, al centre de la qual es rosca una vàlvula de bola que donarà lloc al sistema de buidat. Tot aquest conjunt es acoblat a una estructura de suport realitzada en perfil·leria d'alumini encarregada d'elevat el cilindre del reactor i mantenir la seva verticalitat.

En una altre sentit, es defineix un sistema d'il·luminació segons un cicle circadiari de 12:12h per mitjà d'unes tires de LED adherides sobre la paret exterior del reactor, de tal manera que aprofitant la flexibilitat d'aquestes es pot adaptar la il·luminació a qualsevol forma de paret de reactor. D'aquesta manera la llum aportada sempre incideix perpendicularment sobre el cultiu, simplificant enormement el càlcul de la intensitat lumínica necessària i l'estudi de la disposició de les fonts lluminoses.

L'estimació del potencial productiu del sistema, realitzat escalant valors experimentals obtinguts per estudis anteriors de diversos autors, defineix per un cultiu sense aportació suplementari de carboni, al voltant dels 1,5Kg/annuals de residu sec de biomassa de microalga.

De l'estudi econòmic detallat se'n deriva un cost de realització de l'equip situat en un valor pròxim als 7000€, sent aquesta una xifra raonable en tractar-se d'un sistema a escala pilot.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>9</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>11</b>
2.1. Objectius del projecte	12
<b>3. QUÍMICA SOSTENIBLE (GREEN CHEMISTRY)<sup>1,2</sup></b>	<b>13</b>
<b>4. LES MICROALGUES</b>	<b>17</b>
4.1. Introducció a les microalgues <sup>2</sup>	17
4.2. Caracterització de les espècies <sup>3</sup>	18
4.2.1. Cianobacteris	18
4.2.2. Algues eucariotes	20
4.3. Funció fotosintètica	21
4.4. Dinàmica de creixement	23
<b>5. APLICACIONS INDUSTRIALS<sup>12</sup></b>	<b>25</b>
5.1. Producció de Biocarburants	25
5.2. Depuració d'aigües residuals	28
5.3. Biofixació del CO <sub>2</sub>	29
5.4. Alimentació humana i animal	30
<b>6. SISTEMES DE PRODUCCIÓ</b>	<b>33</b>
6.1. Sistemes oberts <sup>12</sup>	33
6.1.1. Open ponds, llacunes	34
6.1.2. Raceway ponds, canals	35
6.1.3. Tancs Circulars	35
6.2. Sistemes tancats, Fotobioreactors (FBR's) <sup>13</sup>	36
6.2.1. FBR's Tubulars	37
6.2.2. FBR's de Parets planes	38
6.2.3. FBR's de columna Vertical.	39
6.3. Mètodes de Recol·lecció, separació i post-tractament. <sup>12</sup>	40
<b>7. REACTORS QUÍMICS<sup>3</sup></b>	<b>45</b>
7.1. Introducció general als Reactors químics	45
7.2. Reactors Batch (RB)	46
7.3. Reactors de mescla completa (CSTR)	47

7.4. Reactors de Flux de Pistó (PFR) .....	48
7.5. Reactors Air-Lift (ALRs) <sup>15</sup> .....	49
7.5.1. Introducció als ALR's. ....	49
7.5.2. Tipus de reactors Air-Lift .....	50
<b>8. DISSENY D'UN FOTOBIOREACTOR AIR-LIFT .....</b>	<b>53</b>
8.1. Materials i equips .....	53
8.1.1. Tipus de bioreactor i geometria .....	53
8.1.2. Materials .....	53
8.1.3. Sistema de control de la temperatura .....	54
8.1.4. Sistema de control de pH.....	55
8.1.5. Sistema d'automatització, PLC .....	56
8.1.6. Vàlvules i ports.....	56
8.1.7. Sistema d'il·luminació .....	57
8.1.8. Difusor .....	57
8.2. Paràmetres de disseny .....	58
8.2.1. Dimensionament <sup>11</sup> .....	58
8.2.2. Airejat.....	59
8.2.3. Transferència de calor .....	59
8.2.4. Il·luminació.....	60
8.3. Càlculs i resultats .....	60
8.3.1. Valors numèrics .....	60
8.3.2. Estructura i modelatge 3D <sup>9</sup> .....	63
<b>9. CONDICIONS D'OPERACIÓ I SEGURETAT .....</b>	<b>77</b>
9.1. Seguretat i normativa de l'operari .....	77
9.2. Emplaçament de la Instal·lació .....	78
<b>10. ESTUDI ECONÒMIC .....</b>	<b>79</b>
<b>11. ESTUDI AMBIENTAL .....</b>	<b>83</b>
11.1. Càlcul de les emissions del procés .....	83
11.2. Ecoindicador 99 .....	83
<b>12. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE .....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>87</b>
<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>91</b>
Referències bibliogràfiques .....	91



## Taula de figures

FIGURA 1. LOCALITZACIÓ DELS PRINCIPALS ACCIDENTS QUÍMICS DE LA HISTÒRIA .....	13
FIGURA 2. MOSTRA DE SPIRULINA.....	19
FIGURA 3. MOSTRA DE <i>ANABAENA SP</i> .....	20
FIGURA 4. MOSTRA DE <i>SCENEDESMUS SP</i> .....	21
FIGURA 5. MOSTRA DE <i>CHLORELLA SP</i> .....	21
FIGURA 6 ESQUEMA PROCÉS DE FOTOSÍNTESI EN EL SI DEL CLOROPLAST .....	23
FIGURA 7. EVOLUCIÓ CREIXEMENT DE MICROALGUES PER FASES .....	23
FIGURA 8. PRINCIPALS APLICACIONS DE LES MICROALGUES .....	25
FIGURA 9. PRODUCTIVITAT EN L OLI/HA DE DIFERENTS CULTIUS .....	27
FIGURA 10 COMPRIMITS ALIMENTARIS COMERCIALS DE LES ESPÈCIES <i>CHLORELLA</i> I <i>SPIRULINA</i> .....	30
FIGURA 11. MOSTRA DE PINSO AMB BASE DE MICROALGUES .....	31
FIGURA 12. CULTIU DE <i>DUNALIELLA</i> EN LLACUNES .....	34
FIGURA 13. RACEWAY PONDS, ESQUEMA BÀSIC.....	35
FIGURA 14. PRODUCCIÓ DE <i>CHLORELLA SP</i> . TANC CIRCULAR .....	36
FIGURA 15. FOTOBIOREACTOR TUBULAR, ESQUEMA .....	38
FIGURA 16. FOTOBIOREACTOR DE PLACA PLANA.....	39
FIGURA 17. FOTOBIOREACTOR DE COLUMNA VERTICAL, ESQUEMA .....	40
FIGURA 18. SEPARACIÓ PER FLOCULACIÓ - FLOTACIÓ .....	41
FIGURA 19: SEPARACIÓ DE BIOMASSA DE MICROALGA PER CENTRIFUGACIÓ .....	42
FIGURA 20. ESQUEMA PROCÉS DE FILTRACIÓ .....	42
FIGURA 21. CLASSIFICACIÓ DE REACTORS SEGONS EL MEDI D'OPERACIÓ.....	45
FIGURA 22. ESQUEMA REACTOR TIPUS BATCH .....	46
FIGURA 23. ESQUEMA REACTOR TIPUS CSTR.....	47
FIGURA 24. DIFERENTS TIPUS DE CONFIGURACIÓ DE REACTORS AGITATS.....	48
FIGURA 25. ESQUEMA D'UN REACTOR DE FLUX DE PISTÓ.....	48
FIGURA 26. ESQUEMA BÀSIC D'UN REACTOR AIR-LIFT .....	50
FIGURA 27. TIPUS DE REACTORS AIR-LIFT EN FUNCIÓ DE LA DISPOSICIÓ DEL LOOP. ....	51
FIGURA 28. SONDA DE TEMPERATURA.....	55
FIGURA 29. DETALL DEL PH-METRE SELECCIONAT .....	56
FIGURA 30 BOBINA DE LLUMS LED .....	57
FIGURA 31. VISTA GENERAL DEL FBR AIR-LIFT DISSENYAT .....	64
FIGURA 32. RENDERITZAT DELS TUBS RISER I DOWNCOMER.....	65
FIGURA 33. DETALL DEL PERFIL EXTERIOR DEL DOWNCOMER.....	66
FIGURA 34. DETALL DEL DESGASIFICADOR O CAMPANA.....	66
FIGURA 35. DETALL DE LA BASE INFERIOR .....	67
FIGURA 36. DETALL TAPA SUPERIOR .....	68
FIGURA 37. DETALL DEL SISTEMA D'AIREJAT PER DISC CERÀMIC .....	69
FIGURA 38. DETALL DE L'ESTRUCTURA DE SUPORT.....	70
FIGURA 39. DETALL RENDERITZAT RODES GIRATORIES AMB FRE .....	70
FIGURA 40. DETALL TAPETES PROTECCIÓ PERFILS .....	71

FIGURA 41. DETALL RENDERITZAT XAPA BASE SUPORT.....	71
FIGURA 42. RENDERITZAT ACOBLAMENT DEL RISER A AL TAPA SUPERIOR.....	72
FIGURA 43. DETALL DE LA UNIÓ DEL DOWNCOMER AB EL DESGASIFICADOR .....	73
FIGURA 44. DETALL ACOBLAMENT DEL SISTEMA D'AIREJAT .....	73
FIGURA 45. DETALL TANCAMENT INFERIOR I FIXACIÓ AL SUPORT .....	74
FIGURA 46. DETALL DEL SISTEMA DE BUIDAT, VÀLVULA DE BOLA. ....	74
FIGURA 47. DETALL DEL DIMENSIONAT EXTERIOR DEL FBR AMB EL SUPORT .....	75
FIGURA 48. SISTEMES GENÈRICS DE PROTECCIÓEN UN LABORATORI DE QUÍMICA .....	77
FIGURA 49. DETALL DE LA CÒFIA I LA MASCARETA PROPOSADES .....	78





# 1. Glossari

<i>FBR</i>	<i>Fotobioreactor</i>
<i>ARL</i>	<i>Air-Lift</i>
<i>D<sub>d</sub></i>	<i>Diàmetre del downcomer (m)</i>
<i>D<sub>r</sub></i>	<i>Diàmetre del riser (m)</i>
<i>H</i>	<i>Altura del downcomer (m)</i>
<i>A<sub>T</sub></i>	<i>Àrea total del sistema (m<sup>2</sup>)</i>
<i>V<sub>d</sub></i>	<i>Volum del downcomer (m<sup>3</sup>)</i>
<i>V<sub>T</sub></i>	<i>Volum total del sistema(m<sup>3</sup>)</i>
<i>V<sub>op</sub></i>	<i>Volum operatiu(m<sup>3</sup>)</i>
<i>I</i>	<i>Intensitat lumínica(lm)</i>
<i>μ</i>	<i>paràmetre específic de creixement(d<sup>-1</sup>)</i>
<i>x<sub>0</sub></i>	<i>Concentració inicial de microalgues en el sistema (g/L)</i>
<i>x</i>	<i>Concentració a temps t de microalgues en el sistema (g/L)</i>
<i>Q<sub>m</sub></i>	<i>Cabal molar de gas (mols/s)</i>
<i>ρ<sub>L</sub></i>	<i>densitat del medi ( kg/m<sup>3</sup>)</i>
<i>h<sub>L</sub></i>	<i>Alçada de la columna de líquid (m)</i>
<i>A<sub>r</sub></i>	<i>Àrea del riser (m<sup>2</sup>)</i>
<i>G</i>	<i>Gravetat (m/s<sup>2</sup>)</i>
<i>U<sub>Gr</sub></i>	<i>Velocitat d'ascens del gas en el riser (m/s)</i>



## 2. INTRODUCCIÓ

És una evidència que la societat actual pateix un seguit de problemàtiques, l'origen de les quals rau en la forta dependència de les fonts de combustible fòssils de cara a satisfer les necessitats energètiques globals. Aquest fet genera diferents tipus d'inestabilitat a nivell planetari. En termes generals la dependència que la majoria dels països sense reserves fòssils presenten en vers dels grans països exportadors, genera forts corrents especulatiu, que en el pitjor dels casos culminen en conflictes territorials sobre les zones més afavorides per aquests tipus de jaciments.

També des del punt de vista ambiental la combustió generalitzada d'aquests recursos allibera grans quantitats de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera, contribuint així a l'augment de l'anomenat efecte hivernacle, que es materialitza en un escalfament global causant de problemes tant greus com el desglaç dels casquets polars, la pujada de nivell dels oceans o la desertització d'algunes zones davant l'escassetat de precipitacions.

Per fer front a aquesta problemàtica, durant els darrers anys han sorgit iniciatives de cara a reduir la dependència global d'aquest tipus de combustibles, prenent força la investigació en els anomenats biocombustibles com ara el biodièsel. Aquest tipus de carburants obtinguts a partir d'olis vegetals de plantes com ara la palma o la colza ha generat certa controvèrsia en constatar-se la competitivitat que els conreus dedicats a aquest fi exerceixen sobre els vinculats tant a l'alimentació humana com animal.

Aquest fet pot desembocar en una escalada dels preus dels productes bàsics a causa de les grans extincions de terreny que són necessàries per produir una alta quantitat d'olis vegetals per mitjà de plantes superiors.

Doncs bé, és en aquest punt on s'obren camí amb força les microalgues, ja que aquestes presenten relacions Oli/ha molt més elevades que qualsevol planta terrestre al mateix temps que no competeixen amb elles pels espais de conreu ja que aquests microorganismes són capaços de desenvolupar-se en condicions extremes.

En base a aquesta última consideració s'ha optat per contribuir al desenvolupament d'aquesta via d'investigació dissenyant un reactor a escala pilot, de cara a cultivar microalgues destinades al camp de la investigació biotecnològica.

## 2.1. Objectius del projecte

En el moment de definir l'objectiu final del projecte, es crea una divisió entre el que serà l'objectiu principal i el seguit de punts particulars a assolir per aconseguir amb aquest últim.

### Objectiu general del projecte.

Disseny, caracterització i dimensionament d'un fotobioreactor tipus air-lift a escala pilot enfocat al cultiu de diferents espècies de microalgues, especialment de la varietat *Chlorella vulgaris* per a fins relacionats amb la recerca.

### Objectius Particulars

- Realitzar una introducció teòrica al món de les microalgues. Aquesta punt tracta conceptes tals com la definició del terme microalga, els diferents tipus de cultiu existents, les condicions claus per al seu creixement així com les seves principals aplicacions industrials.
- Definició del concepte de fotobioreactor air-lif entrant a definir els tipus de configuracions existents i els paràmetres principals de disseny.
- Estimació de la producció potencial de la microalga *Chlorella vulgaris* en el sistema dissenyat en base a la consulta d'estudis experimentals previs.
- Disseny d'un Fotobioreactor tipus Air-lift i la seva estructura de suport, realització dels plànols pertinents.
- Estudi econòmic detallat del projecte des dels costos de disseny fins a la seva implantació.
- Anàlisi de l'impacte ambiental de la seva implantació i funcionament.

### 3. Química sostenible (*Green Chemistry*)<sup>1,2</sup>

La química sostenible o altrament coneguda com a química verda no és més que una forma diferent de pensar respecte els plantejaments tradicionals d'aquesta indústria. Aquesta idea implica consumir esforços en totes les etapes del procés, des de la fase de disseny, passant pel desenvolupament i culminant amb una implantació fidel a un pensament dirigit a preservar el benestar de la població i la protecció del planeta, sense obviar en cap cas la necessitat de benefici econòmic del projecte.

Durant les darreres dècades del segle XX van tenir lloc un seguit d'accidents industrials i ambientals vinculats al sector de la indústria química que van contribuir a generar-ne una mala imatge pública. A la Figura 1 es destaca els incidents més importants.



Figura 1. Localització dels principals accidents químics de la història

No obstant d'entre tots els citats destaca un per sobre de tot, el que va tenir lloc a la ciutat índia de Bhopal el 1984. El 3 de desembre d'aquell any es va produir una fuga d'isocianat de metil d'una planta de pesticides propietat de la companyia nord americana Union Carbide deixant milers de morts i desenes de milers de persones afectades.

Arran de la conscienciació creixent derivada d'aquests greus accidents i d'altres fenòmens més globals com ara al contaminació ambiental, neix el concepte de Green Chemistry .

Per la qual cosa, per tal de dirigir i facilitar el compliment d'aquesta forma d'entendre l'indústria química a tècnics i científics, al llarg dels darrers anys s'han anat definint un seguit de principis, fins a la disposició actual de 12, els quals són citats a continuació.

**1. Prevenció:** Sempre serà millor prevenir un accident o una generació de residus que no aplicar mesures posteriors.

**2. Economia atòmica.** Els mètodes de síntesi hauran de dissenyar-se de tal manera que el màxim nombre de reactius emprats s'incorporin al producte final.

**3. Mètodes de síntesi menys perillosos.** Les metodologies de síntesi han d'evitar tant la necessitat d'utilitzar com generar compostos tòxics per la salut humana o el medi ambient.

**4. Disseny de productes més segurs.** El disseny de productes ha de vetllar per mantenir la seva funció, reduint la seva toxicitat.

**5. Dissolvents i auxiliars més segurs.** Evitar l'ús, sempre que el procés ho permeti, de dissolvents o agents de separació o en cas de ser imprescindibles emprar productes innocus ambientalment.

**6. Eficàcia energètica.** El consum d'energia al llarg del procés ha de ser minimitzat per raons econòmiques i ambientals. En la mesura que sigui possible es plantejaran processos de síntesi a temperatura ambient.

**7. Ús de matèries primes renovables.** S'ha de fomentar l'ús sempre que sigui possible tant tècnicament com econòmicament de matèries primeres renovables.

**8. Reduir l'ús de derivats.** S'ha d'evitar l'ús i generació de derivats (bloqueig de grups, protecció, modificació temporal de les condicions físiques/químiques) en la mesura del possible

**9. Catàlisi:** L'ús de reactius catalítics serà primat per davant dels de comportament estequiomètric.

**10. Disseny per a la degradació.** S'han d'avançar cap al disseny de productes químics tals que la seva funció no persisteixi en el medi ambient i pel contrari degradin a productes innocus.

**11. Anàlisi a temps real.** S'han d'implementar metodologies analítiques que permetin un anàlisi a temps real, una monitorització interna i un control previ a la formació de substàncies perilloses.

**12. Síntesis químiques més segures.** S'han d'escollir substàncies de tal manera que en un procés químic es minimitzi el risc potencial d'accidents com és el cas de fugues o explosions.





## 4. Les microalgues

### 4.1. Introducció a les microalgues<sup>2</sup>

Sota la denominació de microalga s'inclouen tots aquells microorganismes unicel·lulars capaços de dur a terme la fotosíntesis. En aquesta categoria queden agrupades tant els cianobacteris (algues verd blavoses) com les algues eucariotes (algues verdes, vermelles o daurades).

Les microalgues són generalment organismes fotoautòtrofs, és a dir, organismes que obtenen la seva energia de la llum del Sol i que es desenvolupen a partir de matèria inorgànica. No obstant, algunes espècies de microalga són capaces de créixer utilitzant matèria orgànica com a font d'energia o de carboni.

Segons aquest criteri podem diferenciar entre quatre grans grups diferents de microalgues:

**Fotoautòtrofes:** Les algues en qüestió obtenen l'energia de la radiació solar i el carboni dels compostos inorgànics (sals).

**Fotoheteròtrofes:** Les algues obtenen l'energia necessària del Sol i s'abasteixen de carboni per mitjà de compostos orgànics.

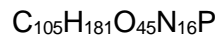
**Mixotròfiques:** Moltes algues tenen la capacitat de créixer per mitjà de processos tant autòtrofs com heteròtrofs, de tal manera que aprofitant la radiació solar aquestes espècies obtenen el carboni tant de compostos orgànics com directament del CO<sub>2</sub>. Alguns exemples podrien ser l'espècie *Spirulina platensis* o la *Chlamydomonas reinhardtii*.

**Heterótrofes:** Els compostos orgànics proporcionen tant l'energia com la font de captació de carboni d'aquest tipus d'algues. Gràcies a aquestes característiques existeixen espècies capaces de desenvolupar-se sota total falta de llum com per ser el cas de la *Chlorella protothecoide*,

La composició de les microalgues entenen amb això el seu contingut en lípids, carbohidrats i proteïnes, és variable i pot ser manipulada mitjançant diferents paràmetres durant el seu procés de cultiu, depenent a més de l'espècie considerada.

En general les cianobactèries presenten un contingut en lípids de fins al 20% en pes sec, mentre el contingut d'aquests en el cas de les algues procarïotes oscil·la al voltant del 20-50%.

Per altra banda, de forma genèrica, a l'hora de caracteritzar aquests organismes és pot prendre de referència la següent fórmula molecular proposada per Grobbelaar(2004).



D'aquesta expressió se'n deriva que de forma teòrica que d'un Kilogram de residu sec de biomassa s'obtidrien les següents masses dels principals components:

- 523,9 g de carboni
- 74,5 g d'hidrogen
- 296.5 g d'oxigen
- 92,2 g de nitrogen
- 12,76 g de fòsfor.

Pel que fa a la dimensió, les algues eucariotes es concentren en un rang comprés entre els 0.5-30  $\mu\text{m}$ . En canvi pel cas dels cianobacteris aquest paràmetre pot arribar a valors de 200 $\mu\text{m}$  (Markou 2011).

Cal destacar el gran nombre d'espècies diferents de microalga existents. Per aquesta raó per posar de relleu la magnitud d'aquest valor és bo fer la comparació amb les plantes terrestres conegudes, al voltant de 250 mil, en front dels milions d'espècies de microalgues que s'estima que existeixen a la Terra.

## 4.2. Caracterització de les espècies<sup>3</sup>

### 4.2.1. Cianobacteris

Els cianobacteris són un ampli grup d'espècies incloses dins del regne dels eubacteris. Són per tant procarïotes, cosa que significa que no presenten un nucli diferenciat sinó que el seu material cel·lular es concentra en una regió del citoplasma denominada nucleoide.

Per altra banda els cianobacteris són organismes planctònics sense motilitat pròpia, amb diferències morfològiques entre si, i presència comú en medis extrems. Es desenvolupen tant

en aigües dolces com en salines sent capaços de presentar grans florides conegudes com a blooms quan el medi està eutrofitzat.

Aquestes espècies han estat conegudes tradicionalment com a algues verd-blavoses degut a que juntament amb la clorofil·la contenen dos pigments coneguts com a ficocianina i ficoeritrina que li aporten aquestes tonalitats.

Alguns exemples d'espècies concretes d'aquest grup són:

***Spirulina***: També coneguda com a *Arthrospira* té el seu rang de PH òptim entre 9-10 i una temperatura òptima de cultiu situada entre els 24-28°C tot i poder arribar a valors de 40-42°C en determinades espècies. De forma general destaquen per la seva alta eficiència en la fixació del CO<sub>2</sub> que pot arribar al 38%.



Figura 2. Mostra de Spirulina

***Anabaena sp.*** El seu rang òptim de pH es situa entre el 7,4 i el 8,4 disminuint dràsticament la seva productivitat a rangs més alts de 9. Presenten bons resultats pel que fa a la fixació de CO<sub>2</sub>.



Figura 3. Mostra de *Anabaena sp*

#### 4.2.2. Algues eucariotes

Les clorofites o algues verdes són una divisió important dins de les microalgues, el color verd de les quals es degut a la clorofil·la ( a y b) i els carotenoides i xantòfils presents en la seva estructura. Igual que els cianobacteris son capaços de créixer ràpidament donant lloc a blooms. La classe més destacada de clorofites són les clorofícies, entre les que a la vegada destaquen els regnes de les volvocales ( organismes d'aigua dolça dotats de flagels) i les clorococccals (microorganismes desprovistes de flagels)

A continuació se citen 3 de les principals espècies englobades en aquesta divisió:

**Scenedesmus:** És una alga clorofícia colonial formada per la unió de 2, 4 o 8 cèl·lules, que en alguns casos com apareix en la Figura4 poden presentar espines en els seus extrems. Són espècies comunes tant en aigües dolces com salobres sempre i quant aquestes presentin nivells alts de nutrients, N i P.



Figura 4. Mostra de *Scenedesmus sp.*

***Chlorella sp.*** Clorofícia d'aparença esfèrica de diàmetre comprés entre els 2 i els 10 $\mu$ m, rica en clorofil·la a i b, que destaca especialment per la seva capacitat d'eliminació de nutrients de l'aigua. Igual que l'anterior es desenvolupa en medis rics en P i N presentant una elevada velocitat de creixement en relació a la resta d'espècies.

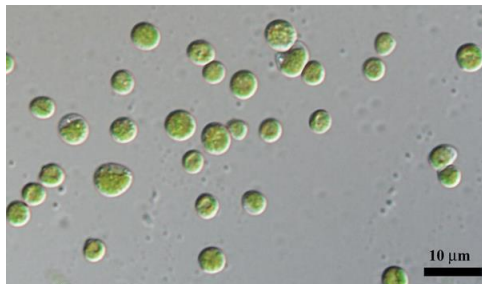


Figura 5. Mostra de *Chlorella sp.*

### 4.3. Funció fotosintètica

La fotosíntesis és un procés realitzat pels organismes fotoautòtrofs, els quals tenen la capacitat de sintetitzar matèria orgànica a partir de l'energia del Sol i fonts de matèria inorgànica.

Aquest procés es de vital importància per la prevalença de la vida a la Terra ja que per mitjà d'ella les microalgues i les plantes verdes superiors introdueixen els nutrients minerals a la

base de la cadena tròfica dels ecosistemes. D'aquesta forma es genera la matèria orgànica que serà consumida posteriorment pels organismes superiors.

Els organismes capaços de realitzar la fotosíntesis utilitzen l'energia procedent de la radiació solar per tal de generar un oxidant prou potent per tal d'extreure de les molècules d'aigua oxigen i electrons. En el si d'aquesta reacció redox, aquests electrons extrets de l'aigua redueixen, en la fase lluminosa de la fotosíntesis el NADP+ a NADPH.

El NADP+ és la forma oxidada de la nicotinamida adenina dinucleòtid fosfat, un coenzim que intervé en un gran nombre de reaccions anabòliques, sent el NADPH la seva forma reduïda. Aquesta intervé en la denominada fase fosca de la fotosíntesis ( Cicle de Calvin) en la qual es redueix el CO<sub>2</sub>. A més a més el NADPH actua com a transportador de l'energia necessària per sintetitzar macromolècules orgàniques a partir molècules precursors més petites.

Seguidament es presenta l'estequiometria del procés de fotosíntesi oxigenada:



Sent:

v: la freqüència de la radiació lluminosa.

h: La constant de Planck.

La fotosíntesis es produeix en uns orgànuls citoplasmàtics de color verd exclusius dels organismes fotosintètics anomenats cloroplasts. En una cambra del seu interior es troba el que es denomina estroma, una part interna on es realitzen les reaccions fosques del cicle de Calvin. L'estroma conté elements bàsics per a la fotosíntesis com és la RBP-carboxilasa el principal enzim responsable de la fixació del CO<sub>2</sub>.

A continuació, a la Figura6 és presenta un esquema del procés fotosintètic a l'interior del cloroplast.

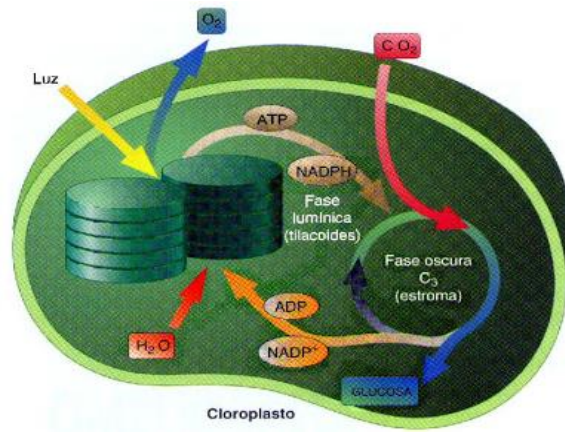


Figura 6 Esquema procés de fotosíntesi en el si del cloroplast

#### 4.4. Dinàmica de creixement

El creixement d'un cultiu de microalgues es caracteritza per quatre fases ( Coutteau, 1996)

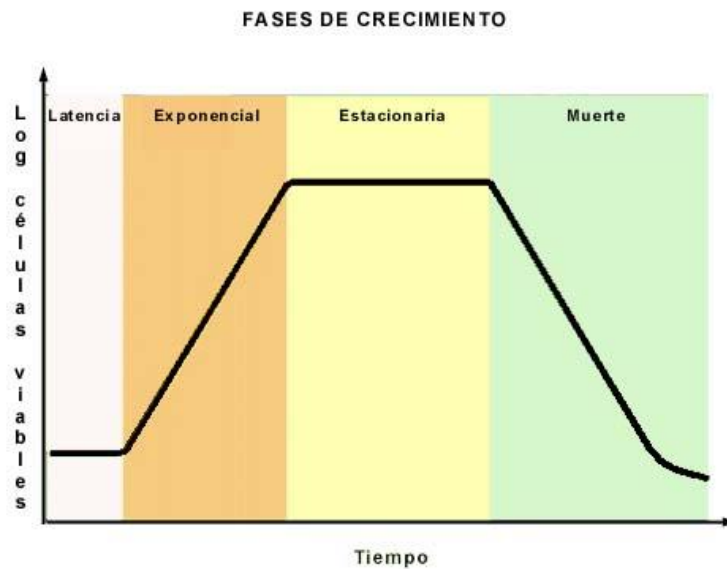


Figura 7. Evolució creixement de microalgues per fases

**Fase de retràs o inducció (1):** En aquesta fase, només es produeix un petit augment de la densitat cel·lular. Els cultius inoculats amb algues que creixen exponencialment tenen fases curtes de retràs, fet que pot reduir considerablement el temps necessari per al seu escalat. El retràs en el creixement s'atribueix a l'adaptació fisiològica del metabolisme de les cèl·lules per al creixement, tals com l'augment dels nivells d'enzims i metabòlits implicats en la divisió cel·lular i la fixació del carboni.

**Fase Exponencial (2):** Durant la segona fase, la densitat cel·lular augmenta com una funció de temps  $t$  d'acord amb la funció logarítmica:

$$C_t = C_0 \cdot e^{\mu t}$$

on  $C_t$  i  $C_0$  són la concentració de cèl·lules en els temps  $t$  i  $0$  respectivament, i  $\mu$  és la taxa de creixement específic. Aquesta taxa depèn principalment de l'espècie d'alga, la intensitat de la llum i la temperatura.

**Fase estacionaria (3):** Aquesta etapa s'inicia amb un alentiment del creixement cel·lular quan factors com ara nutrients, llum, pH i diòxid de carboni entre d'altres, comencen a actuar com a limitants. Seguidament aquests limitants s'equilibren amb la taxa de creixement donant lloc a una densitat cel·lular relativament constant.

**Fase mort o d'accident (4):** Durant el transcurs d'aquesta etapa final, es deteriora la qualitat de l'aigua i els nutrients s'esgoten a nivells incapaços de sostenir el creixement. En conseqüència la densitat cel·lular disminueix ràpidament i el cultiu pot arribar a colapsar.

A efectes pràctics, els accidents de cultiu poden ser causats per una gran varietat de raons, incloent l'esgotament de nutrients, recalentament, alteració del pH o contaminació. Tot i així la clau per a l'èxit de la producció rau en mantenir els cultius en la seva fase exponencial de creixement. A més a més, el valor nutritiu de les algues produïdes és inferior un cop el cultiu sobrepassa la fase 3 degut a la digestibilitat reduïda, la composició deficient i la possible producció de metabòlits tòxics.



## 5. Aplicacions Industrials<sup>12</sup>

Duran les darreres dècades del segle XX i principis del XXI el desenvolupament tècnic, industrial i empresarial lligat a la producció de microalgues i productes derivats ha guanyat un interès creixent gràcies al paper que poden jugar aquestes en pal·liar les tres principals crisis que pateix la humanitat actualment: Energètica, Ambiental i Alimentària.

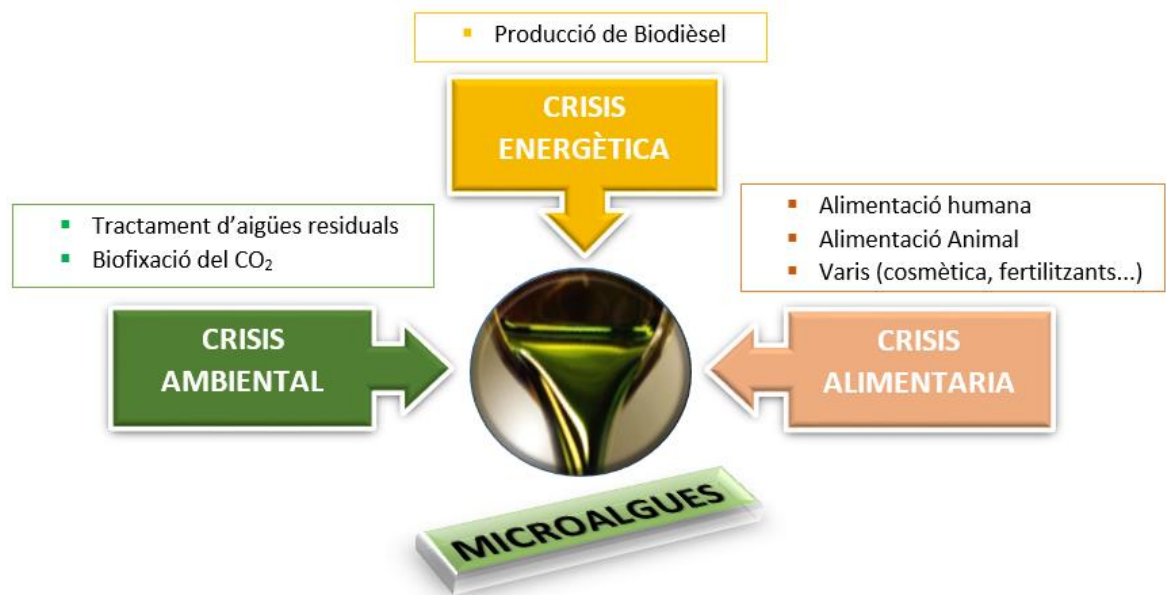


Figura 8. Principals aplicacions de les microalgues

A continuació és presenten algunes de les aplicacions de major interès en ús i desenvolupament a dia d'avui.

### 5.1. Producció de Biocarburants

En l'actualitat, la recerca de fonts d'energia capaces de representar una alternativa real a la situació de dependència dels combustibles fòssils representa un dels principals reptes d'investigació i desenvolupament del segle XXI. Aquests estudis han de respondre a la previsió d'esgotament de les reserves mundials en les properes dècades així com als possibles conflictes tant econòmics com ambientals que puguin derivar del ritme actual de

consum. Aportar la capacitat de poder fer front a problemes com l'emissió de gasos d'efecte hivernacle, l'especulació del preu del barril de petroli o la dependència dels principals països productors són raons per al desenvolupament d'aquest tipus de combustibles.

Per altra banda bona prova de la importància que dona la política global a aquestes vies d'investigació queda reflectit clarament citant per exemple la Directiva 2003/30/CE que marca com objectiu que el 5,75% del consum total de gasolina i/o gasoil sigui en forma de biocarburants.

Actualment la investigació en microalgues enfocada a la producció de biocarburants està centra majoritàriament en l'obtenció de cultius amb una alt contingut en lípids de cara a la producció de biodièsel (combustible líquid obtingut a partir de lípids sotmesos a processos de esterificació i transesterificació). Aquesta variació en la composició bàsica dels cultius de microalgues és pot provocar d'una forma relativament fàcil actuant sobre les característiques físico-químiques del medi de cultiu. Aquestes actuacions poden anar dirigides a variar la salinitat del medi, la temperatura, el PH o la disponibilitat de nutrients.

De forma general, l'acumulació de lípids s'atribueix a un consum de sucres major al creixement cel·lular que afavoreix la conversió a lípids dels sucres que es troben en excés. No obstant aquestes condicions tendeixen a reduir la velocitat de creixement del cultiu.

Seguidament es citen els principals punts d'interès de les microalgues en el camp del biodièsel:

- En comparació amb els olis vegetals tradicionalment emprats per a la producció de biocombustibles, els conreus de microalgues no competeixen amb els productes d'alimentació pels sòls fèrtils ja que aquestes últimes es poden desenvolupar en zones no aptes per l'agricultura.
- Poden captar el CO<sub>2</sub> necessari pel seu creixement de emissions procedents de combustions industrials. ( eficients fixadores del CO<sub>2</sub>)
- No existeix un règim estacionari de collita, per la qual cosa la producció pot ser permanent al llarg d'un any. D'aquesta manera la seva productivitat, entesa com la quantitat de lípids produïts anualment en relació a la Superfície de cultiu és molt superior a qualsevol espècie de planta superior com és mostra al gràfic adjunt:

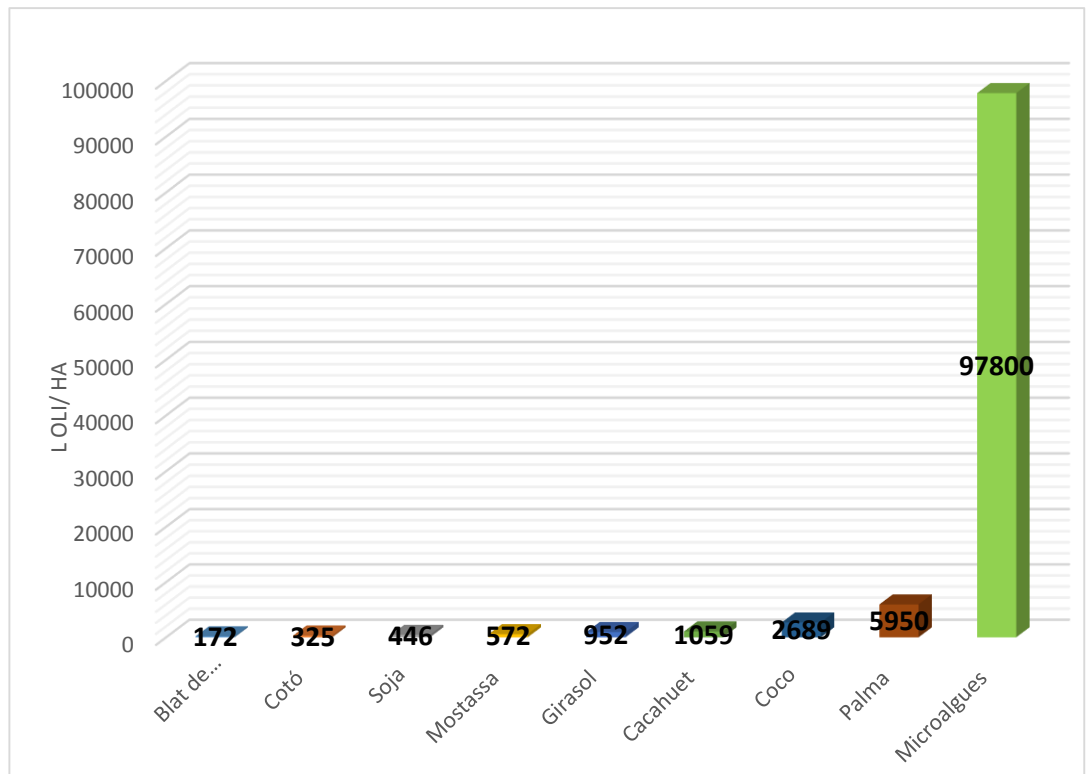


Figura 9. Productivitat en L oli/ha de diferents cultius

- Alta velocitat de creixement en comparació amb els cultius de plantes terrestres superiors, arribant algunes espècies a doblar la seva biomassa en 3,5h en fase de creixement exponencial.
- El consum d'aigua es menor al destinat a les plantes terrestres, podent-se utilitzar aigües residuals urbanes o industrials d'on obtindran els seus principals nutrients, Nitrogen i Fòsfor.
- El seu cultiu no requereix l'ús de productes fitosanitaris com ara herbicides o pesticides.

Per altra banda, les microalgues presenten un important problema en el procés de separació i extracció dels lípids de les cèl·lules, requerint de costosos procediments d'alt consum

energètic que fan que difícilment puguin competir al mercat amb els preus relativament baixos dels carburants d'origen fòssil

## 5.2. Depuració d'aigües residuals

La depuració d'aigües per mitjà de de cultius de microalgues està englobada dintre dels processos coneguts com **fitoremediació**.

Aquesta tecnologia consisteix en aprofitar la capacitat de certes plantes per absorbir, acumular, metabolitzar, volatilitzar o estabilitzar contaminants presents en el sòl, l'aire, l'aigua o sediments com: metalls pesats, metalls radioactius, compostos orgànics i compostos derivats del petroli. Aquests processos presenten nombrosos avantatges respecte als mètodes fisicoquímics, com pot ser la seva alta aplicabilitat a baix cost.

L'ús de les algues relacionat amb tractament d'aigües residuals es pot dir que va començar a desenvolupar-se l'any 1957 amb Oswald i els seus cultius de microalgues en sistemes oberts de tipus llacuna. Des de llavors, l'interès d'aquests organismes en el camp del tractament d'aigües no ha fet més que créixer gràcies al gran potencial que les microalgues presenten en l'eliminació de nutrients en aigües urbanes, industrials i agrícoles.

La gran majoria dels sistemes utilitzats en l'actualitat per al tractament d'aigües presenta un cultiu en suspensió de les microalgues en el fluid en qüestió, no obstant també s'estan realitzant estudis enfocats tractaments on les algues es troben fixes en un medi de suport com pot ser un alginat o un biofilm.

Per altra banda, el nombre d'espècies que presenten bons resultats en depuració d'aigües és molt elevat, arribant a eliminacions de fins al 100% en determinats components i condicions d'operació. En la Taula 1 es presenten algunes de les més destacades juntament amb el tipus d'aplicació més idoni.

Microalga	Tipus d'aigües residuals
<i>Prototheca zopfi</i>	Hidrocarburs derivats del petroli
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Pigments azoics en aigües residuals
<i>Chorella sp</i>	Residus de ramaderia digerits anaeròbiament.
<i>Ankistrodesmus i Scenedesmus</i>	Aigües industrials de l'industria paperera.
<i>Scenedesmus sp</i>	Alts nivells d'amoni ( digestió anaeròbia).
<i>Botryococcus braunii</i>	Aigües residuals de tractaments secundaris.
<i>Spirulina platensis</i>	Aigua residual urbana

---

Taula 1. Espècies d'alga en relació a la seva aplicació

### 5.3. Biofixació del CO<sub>2</sub>

Des de la segona meitat del segle XX fins a dia d'avui s'ha pogut constatar com accions perpetrades per la humanitat provocaven canvis ambientals mesurables a nivell global. El denominat popularment canvi climàtic.

Un dels principals compostos que intervenen en aquesta problemàtica és el CO<sub>2</sub> d'origen antropogènic, generat bàsicament per l'ús de combustibles fòssils. Les emissions generades per la crema de petroli, carbó i altres derivats ha provocat un augment de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>, la qual s'havia mantingut estable des del període precambrià fins a la revolució industrial. Aquest increment de CO<sub>2</sub> atmosfèric ha contribuït a l'augment de la temperatura global del planeta i tots els efectes colaterals que se'n deriven en ser part el diòxid de carboni dels principals promotors de l'efecte hivernacle.

No en va, el protocol de Kioto, un acord firmat pels principals països industrialitzats l'11 de desembre de 1997, marcava una via cap al desenvolupament sostenible, establint per primer cop en la història l'objectiu de reduir les emissions de CO<sub>2</sub> de cara al futur.

Doncs bé, és en aquests objectius de reducció de les emissions globals de CO<sub>2</sub> on les microalgues poden jugar un paper important. Donat que molts estudis consideren que la

reforestació podria pal·liar parcialment el problema de l'escalfament global, organismes com les microalgues i els cianobacteris amb una eficiència de fixació del CO<sub>2</sub> entre 10 i 50 vegades superior a les plantes terrestres, poden donar una resposta encara més eficient a la problemàtica actual.

Les principals raons que fan de les microalgues els organismes més adequats per a la fixació del CO<sub>2</sub> en gasos combustió són:

- Presenten la capacitat d'adaptar-se ràpidament a condicions de cultiu canviants ( temperatura, pH, salinitat...)
- Milloren la seva productivitat en concentracions de CO<sub>2</sub> per sobre l'atmosfèrica, al contrari que les plantes terrestres.
- La seva alta relació Superfície / Volum ajuda a una ràpida difusió del CO<sub>2</sub> d'aquesta manera s'afavoreixen els cultius d'alta densitat i ràpida fixació del CO<sub>2</sub>. El consum total de diòxid e carboni en microalgues es sol situar entre els 200 i els 600 mg CO<sub>2</sub> / L·d arribant a valors de 800-1000 mg CO<sub>2</sub> / L·d en cultius de l'espècie *Chlorella sp.*

## 5.4. Alimentació humana i animal

Actualment el consum humà de microalgues està limitat a unes poques espècies a causa de l'estricta legislació sobre el control alimentari, els factors socioculturals que afecten la demanda en el mercat i una costosa preparació específica prèvia a la seva comercialització.

Per la qual cosa el consum alimentari de microalgues es concentra bàsicament en 3 gèneres concrets, la *Chlorella*, la *Dunaliella* i la *Spirulina* totes elles comercialitzades principalment com a suplementos alimentaris.



Figura 10 Comprimits alimentaris comercials de les espècies *Chlorella* i *Spirulina*

Agafant d'exemple la *Dunaliella*, la qual cultivada sota condicions d'estrès per alta salinitat del medi tendeix a presentar altes concentracions de  $\beta$ -carotens, un dels principals precursors de la Vitamina A.

Les propietats antioxidants que presenten aquests compostos actuen com a antioxidants, neutralitzant els radicals lliures que incideixen negativament sobre els lípids de les membranes cel·lulars.

Pel que fa a l'alimentació animal, els pinsos amb contingut de biomassa de microalga principalment del gènere *Spirulina* i *Chlorella* van guanyant terreny progressivament arribant a representar el destí final de fins el 30% de la producció mundial. A la seva alta qualitat nutricional principalment deguda a l'alt contingut de proteïnes i àcids grassos poliinsaturats si sumen les propietats de millora de la palabilitat del producte.



---

Figura 11. Mostra de pinso amb base de microalgues

Des del punt de vista ecològic la incorporació de les microalgues als productes d'alimentació bovina, aviar o porcina disminueix la dependència de les farines de peix i els olis tradicionals, contribuint a reduir la pesca extractiva. No obstant cal remarcar que la biomassa algal, lluny de ser una novetat és un component freqüentment utilitzat en l'aqüicultura, sent una partida bàsica en l'alimentació de cultius de mol·lusc, crustacis i alguns peixos de piscifactoria.





## 6. Sistemes de Producció

Tal i com s'ha introduït en apartats anteriors, les microalgues es poden cultivar de manera fotoautòtrofa, fotoheteròtrofa, heteròtrofa o en condicions mixotròfiques. No obstant, la producció fotoautòtrofa és avui en dia, l'únic dels diversos mètodes existents que permet una producció a gran escala amb resultats econòmicament rentables i tècnicament viables en el cas de solament basar-se en la producció de biomassa de microalga.

En base a les condicions de cultiu fotoautòtrofes sorgeixen dos grans solucions tècniques per a la producció de microalgues.

Per una banda els denominats **sistemes oberts** (canals o estancs) presenten avantatges de simplicitat tècnica i constructiva tot i que pel contrari no permeten assegurar un bon control de les condicions de creixement al estar fortament exposats als fenòmens atmosfèrics i les plagues.

Per l'altra en canvi, els **sistemes tancats** (fotobioreactors) tot i requerir un disseny i construcció tècnicament més complex, asseguren un control gairebé total de les condicions de cultiu així com un aïllament del medi exterior de cara a evitar possibles contaminacions d'altres espècies no desitjades.

### 6.1. Sistemes oberts<sup>12</sup>

El cultiu de microalgues en sistemes oberts s'ha anat utilitzant i desenvolupant des de mitjans dels anys 50, erigint-se fins l'actualitat en el mètode més comú de cultiu a gran escala (Pulz 2001).

Aquests sistemes a la vegada es subdivideixen en els cultius d'aigües superficials naturals com poden ser estancs, llacunes o llacs. Per altra banda dins dels sistemes oberts es troben els formats per estancs artificials, els quals presenten multitud de configuracions en forma de llacunes, estancs circulars i de canals (raceway ponds) que es defineixen com els més freqüents. Seguidament es presenten els principals avantatges dels sistemes oberts:

- Baix cost de construcció.
- Baix cost de funcionament.

Com a contrapartida es poden destacar un seguit de desavantatges:

- Baixa Productivitat ( baixa densitat de cultiu)
- Necessitat de grans Superfícies de cultiu.
- Falta de control sobre el cultiu
- Risc de plagues i contaminació. (atacs bacterians)
- Dificil control de la temperatura
- Dificultats en el mesclat
- Limitació llum capes inferiors
- Deficiències difusió CO<sub>2</sub>

### 6.1.1. Open ponds, llacunes

Les bases obertes o també denominades llacunes “open pond” són piscines artificials de poca profunditat on les microalgues creixen sense cap element de mesclat, gràcies als nutrients presents en el medi i el CO<sub>2</sub> ambiental.

En aquest tipus de cultiu es molt difícil exercir cap tipus de control sobre els paràmetres que afecten el creixement, limitant en els millors dels casos la contaminació del cultiu amb altres espècies no desitjades extremant condicions com ara la salinitat. Exemple de conreu emprat en la *Dunaliella salina*.



Figura 12. Cultiu de *Dunaliella* en llacunes

### 6.1.2. Raceway ponds, canals

Els canals o “raceway ponds” solen estar construïts per canals de formigó ovalats i profunditats compreses entre els 15-20 cm que conformen un circuit tancat on el cultiu es va recirculant per tal de facilitar el mesclat de cara a estabilitzar el creixement i maximitzar la productivitat de les microalgues.

Tant l'inòcul com els nutrients solen ser integrats al sistema en el seu inici, sent les microalgues recirculades al llarg del bucle fins al punt d'extracció gràcies a l'acció d'un rodet o la disposició d'injectors. D'aquesta manera s'homogeneïtza el cultiu i s'intenta evitar excessiva sedimentació.

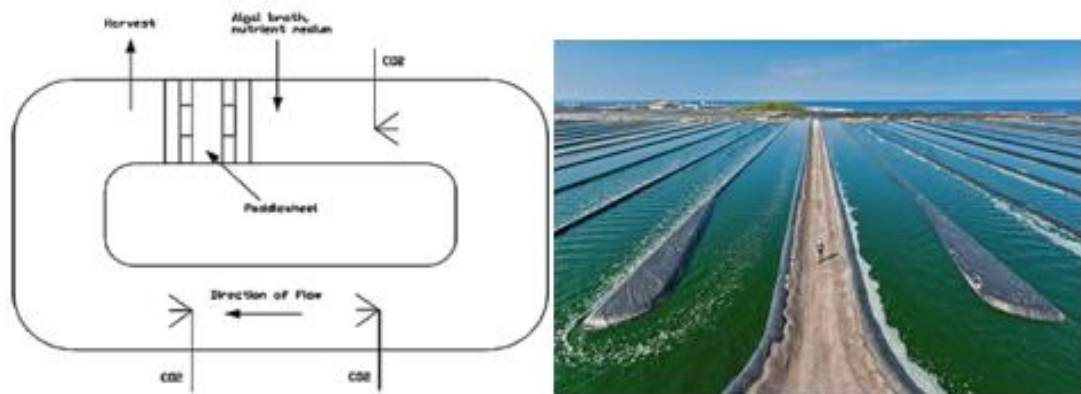


Figura 13. Raceway ponds, esquema bàsic

Per altra banda degut a la poca profunditat d'aquests canals, la difusió del  $\text{CO}_2$  atmosfèric en el cultiu sol ser suficient per a un correcte creixement de les microalgues, no obstant és possible integrar difusors en el fons del sistema com a complement a la difusió ambiental.

### 6.1.3. Tancs Circulars

Aquests sistemes presenten diferents inconvenients com ara un escàs aprofitament del sòl, uns elevats costos de construcció (normalment tancs de formigó) i un alt consum d'energia ja que l'agitació consisteix en una gran pala que gira contínuament recorrent tota la superfície.



Figura 14. Producció de *Chlorella sp.* Tanc circular

Tot i els nombrosos factors negatius, en el passat, aquest tipus sistema era molt emprat a Japó, Taiwan i Indonèsia per a la producció de *Chlorella*. Actualment es troben en una fase de desús progressiu.

## 6.2. Sistemes tancats, Fotobioreactors (FBR's)<sup>13</sup>

Un fotobioreactor (FBR's) podria ser definit com un sistema tancat de parets transparents per tal de permetre la il·luminació del seu interior amb l'objectiu de controlar i maximitzar la producció d'un determinat organisme fotosintètic, generalment microalgues.

Els FBR's es caracteritzen per la capacitat de regulació i control de la majoria dels paràmetres de creixement dels cultius. Al mateix temps presenten un baix risc de contaminació i baixes pèrdues de CO<sub>2</sub> per difusió amb l'exterior. Tots aquests factors porten a poder operar en condicions fàcilment reproduïbles.

Seguidament es presenten alguns dels avantatges d'aquests tipus de sistemes:

- Alta productivitat per Km<sup>2</sup>.
- Possibilitat de producció continua.
- Total control del creixement algal.
- Mínim temps de manteniment i neteja.
- Vida útil de prop de 30 anys en reactors de vidre.
- Àmplia àrea il·luminada

No obstant com a punts a millorar presenta:

- Major cost d'inversió vers els sistemes oberts.
- Major complexitat tècnica i constructiva.
- Dificultats en resoldre les acumulacions d'O<sub>2</sub> (especialment en tubulars)
- Problemes d'estres hidrodinàmic. ( Important selecció de les espècies).

### 6.2.1. FBR's Tubulars

Els Fotobioreactors tubulars són un dels dissenys més estesos de cara al cultiu d'algues de forma intensiva i controlada a l'exterior prenent com a font d'energia lluminosa de la radiació solar diürna. El motiu principal d'aquest fet és la bona relació Àrea Il·luminada / Volum de reactor que presenten, optimitzant al màxim el sòl.

Pel que fa al seu disseny, aquest es pot dividir bàsicament en dos parts, el llaç i el desgasificador.

**Llaç:** És la part on insereix la radiació solar, pensada bàsicament per maximitzar la seva captació. La denominació "llaç" es basa en la disposició dels tubs que en ares aconseguir una estructura el màxim de compacta requereix una gran quantitat de colzes i corbes.

**Desgasificador:** Fa referència a la part on es dur a terme la desorció del O<sub>2</sub> i el control de la temperatura a través de la instal·lació d'intercanviadors de calor.



Figura 15. Fotobioreactor tubular, esquema

No obstant la transferència de matèria així com el grau d'agitació del sistema presenten grans limitacions, provocant altes concentracions de  $O_2$  que afecten negativament el desenvolupament de les microalgues. Per altra banda els problemes de fotoinhibició solen ser freqüents ja que al no presentar bons graus de mescla les cèl·lules properes a les parets exteriors reben grans quantitats de radiació mentre les situades a la part central pateixen deficiència d'il·luminació.

### 6.2.2. FBR's de Parets planes

L'estructura bàsica d'aquests tipus de fotobioreactors són dues làmines transparents generalment de plàstic rígid o flexible, unides a un bastidor el qual pot trobar-se en disposició vertical o inclinada. El cultiu disposat a l'espai interior delimitat per aquests elements és agitat per mitjà de sistemes mecànics o pneumàtics.

Pel que al dimensionament dels equips, l'espai entre lamines pot ser d'entre 1-20cm i l'altura de fins a 2m.



Figura 16. Fotobioreactor de placa plana

Com a avantatge respecte altres dissenys presenten grans superfícies de cultiu exposades directament a la radiació solar en relació a l'àrea de terreny ocupada pel reactor. També com a punt fort mostren acumulacions de  $O_2$  en dissolució poc elevades i altes eficiències fotosintètiques.

Per contra resulta difícil mantenir uns nivells de turbulència adequada en el si el fluid de cultiu, al mateix temps que això implica dificultats en el control de la temperatura del sistema. També per aquesta configuració, es pot donar problemes d'estrès hidrodinàmic en algunes espècies.

### 6.2.3. FBR's de columna Vertical.

Els fotobioreactors de columna vertical estan formats bàsicament per un tub vertical d'altura generalment compresa entre 1-3m i un diàmetre que pot oscil·lar entre els 5 i els 50cm.

A l'interior d'aquest es fa bombollejar aire des del fons actuant com a sistema d'agitació.



Figura 17. Fotobioreactor de columna vertical, esquema

En termes generals són compactes i senzills tant d'operar com d'esterilitzar, fet que també és tradueix en baixos costos de construcció i funcionament,

Per la seva posició vertical absorbeixen menys radiació que els disposats horitzontalment en el cas de utilitzar el Sol com a font lumínica. No obstant això disposats verticalment presenten menys acumulació de  $O_2$ , ja que la seva desorció té lloc lliurement a la part superior del sistema.

Aquests reactor acostumen a ser emprats per a la producció d'inòculs ja que presenten un elevat control de les condicions d'operació.

### 6.3. Mètodes de Recol·lecció, separació i post-tractament.<sup>12</sup>

Les microalgues, generalment tendeixen a presentar dificultats en el moment de la seva recol·lecció i separació del medi de cultiu. Part d'aquesta problemàtica parteix de la seva petita dimensió, fet que converteix aquesta fase en una etapa determinant a l'hora de valorar la rentabilitat i el balanç energètic del projecte, representant entre el 20-30% del cost total del procés (Molina Grima 2003).



No obstant algunes varietats concretes de cianobacteris de major dimensió poden arribar a sedimentar per decantació espontània o pel contrari flotar en forma d'agregats formats per biofloculació que també faciliten la seva decantació.

Un mètode d'extracció adequat podrà involucrar una o més etapes i dotar-se de diversos sistemes físics, químics o biològics per tal d'aconseguir processar a cost raonable grans volums de cultiu. Normalment tenen lloc dos etapes, una primera on es realitza una separació fins a concentracions de 5-7% mitjançant processos de floculació, sedimentació per gravetat o flotació i posteriorment una segona etapa on es realitza un assecat més fi mitjançant centrifugació, ultrafiltració o ultrasons.

Es doncs, justament en aquest camp, on actualment existeix un major espai d'investigació i desenvolupament tot i que avui en dia els processos més freqüents són els detallats a continuació.

La **flotació** només es factible en casos on les espècies tendeixen a flotar naturalment, sense necessitat de reactius químics. Pel contrari amb la **floculació**, consistent en addicionar cations multivalents o polimèrics ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) per neutralitzar les cargues negatives que de forma natural presenten les membranes exterior de les microalgues, facilitant així la seva agregació.



Figura 18. Separació per floculació - flotació

Pel que fa a la **decantació**, la seva eficàcia depèn bàsicament del radi del cianobacteri i la seva densitat en el medi de cultiu. És el mètode més utilitzat en el tractament d'aigües residuals degut a les grans quantitats de biomassa amb que es treballa i el seu baix valor afegit, normalment algues de l'espècie *Spirulina*. Per altra banda també és possible aplicar

**ultrasons** prèviament a la decantació de manera que s'optimitza l'eficàcia de l'agregació i per consegüent el procés de separació posterior.

En el cas de productes d'alt valor afegit, la **centrifugació** és el mètode més estès tot i presentar algun factor negatiu com ara un relativament elevat consum energètic, un cost important de manteniment de l'equip i el risc de danyar les cèl·lules degut a l'esforç al que són sotmeses. Tot i així és un mètode ràpid, que permet separar les algues directament del medi de cultiu, assolint graus de sequedat al voltant del 85%. (Molina Grima 2003)



Figura 19: Separació de biomassa de microalga per centrifugació

La **filtració** és un procés de separació de sòlids en suspensió en un líquid a través d'un medi porós que reté els sòlids tot permetent el pas del líquid. Pel cas concret de la separació en cultius de microalgues se sol aplicar un procés d'ultrafiltració tangencial ceràmica (UFTC). Aquest mètode aplicat en situacions d'alimentació amb altes concentracions de sòlids en suspensió i volums menors a 2m<sup>3</sup>/dia pot representar un sistema de separació més rentable en front d'altres també molt generalitzats com ara la centrifugació.(Brennan 2010).

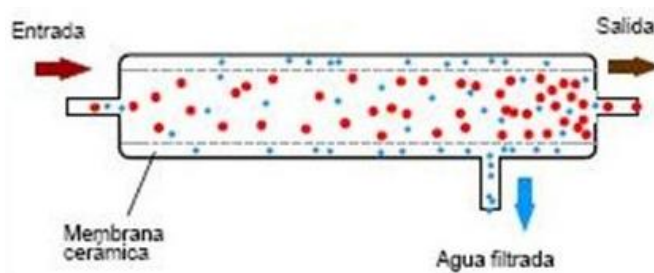


Figura 20. Esquema procés de filtració

Com a contrapunt, les microalgues poden causar un important efecte de *Fouling* a les membranes degut a que segreguen matèria orgànica extracel·lular que augmenta la resistència a la filtració. En l'actualitat s'estan desenvolupant pretractaments per fer front a aquest efecte no desitjat.



## 7. Reactors químics<sup>3</sup>

### 7.1. Introducció general als Reactors químics.

En termes generals, un reactor químic, pot ser definit com un recipient qualsevol a l'interior del qual es produeixi una reacció química. En aquest sentit l'enginyeria de reactors no és més que resoldre la problemàtica de trobar el sistema més adequat, mantenint una mateixa metodologia independent del volum i la reacció a tractar.

Segons el nombre de fases diferents que intervien en la reacció, podem fer una subdivisió entre reaccions homogènies i reaccions heterogènies.

Les denominades homogènies seran totes aquelles que precisen d'una sola fase, la composició de la qual, és idèntica en totes les parts del sistema. Per altra banda és fàcil deduir que les reaccions homogènies seran les que per poder-se produir necessitaran la presència de més d'una fase. Dintre dels reactors heterogenis podrem subdividir-los entre els catalítics i els no catalítics i al presentar més d'una fase implicaran la consideració dels fenòmens de transferència de massa.

Seguidament en la Figura.21 es mostra de forma molt visual els tipus de reactors existents ja citats, en relació a les fases diferents en que operen.

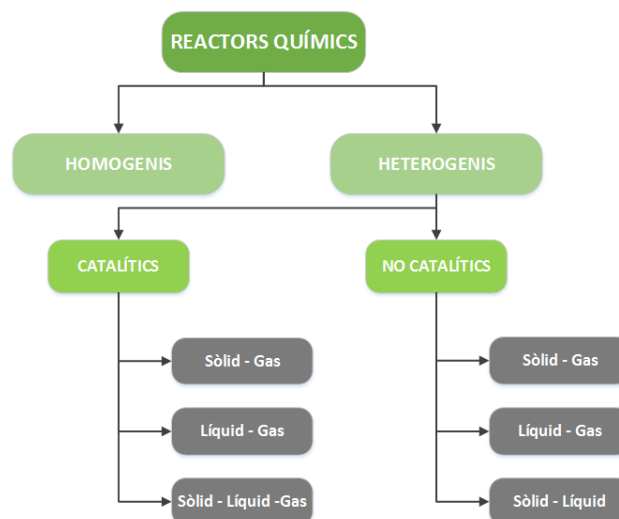


Figura 21. Classificació de reactors segons el medi d'operació

## 7.2. Reactors Batch (RB)

Els reactors intermitents de tanc agitat, popularment coneguts per la terminologia anglesa Reactor Batch (RB) és un tipus de sistema molt utilitzat en laboratoris de cara a fer estudis cinètics i industrialment en el sector de la química farmacèutica.

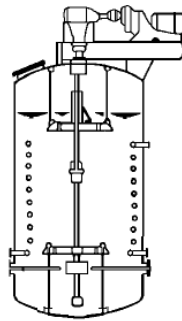


Figura 22. Esquema reactor tipus Batch

Per la seva forma d'operació, presenta les següents característiques.

- El reactor intermitent és un sistema tancat, per la qual cosa la massa total d'aquest és constant. Al no existir entrada ni sortida de matèria,

$$F_{A0} = F_A = 0$$

Per la qual cosa l'equació de balanç general es redueix a:

$$\int_0^V r_A dV = \frac{dN_A}{dt}$$

- El temps de residència (t) de tots els elements és el mateix.
- L'operació d'aquest tipus de reactor està directament vinculat a l'estat estacionari, ja que les concentracions varien en funció del temps.
- Gràcies a l'existència d'un sistema d'agitació es pot considerar que la composició i la temperatura són constants dins del reactor, considerant-se aquest com un sol element de volum.

- L'energia dins del sistema canvia en funció de com es produeix la reacció. Existeix la possibilitat d'addicionar un intercanviador de calor per al control de la T.

### 7.3. Reactors de mescla completa (CSTR)

Aquest tipus de sistemes continus presenten les següents característiques:

- Gràcies a un sistema d'agitació eficient el fluid a l'interior del recipient està uniformement mesclat, en conseqüència tots els elements tenen la mateixa probabilitat d'abandonar el reactor en qualsevol instant de temps.

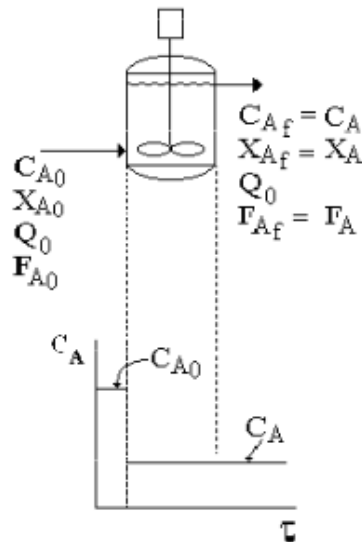


Figura 23. Esquema reactor tipus CSTR

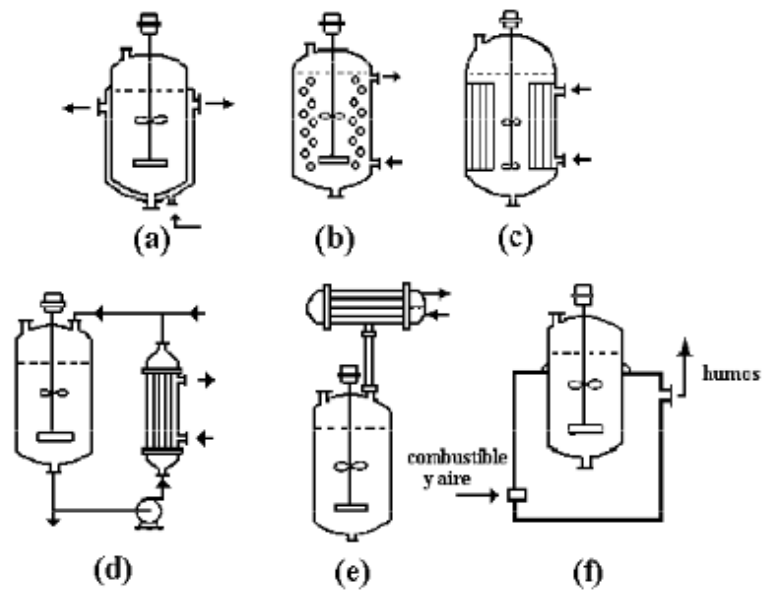


Figura 24. Diferents tipus de configuració de reactors agitats

### 7.4. Reactors de Flux de Pistó (PFR)

També coneguts com a reactors Tubulars o Pug Flow Reactor (PFR), les principals característiques d'aquest tipus de sistemes són:

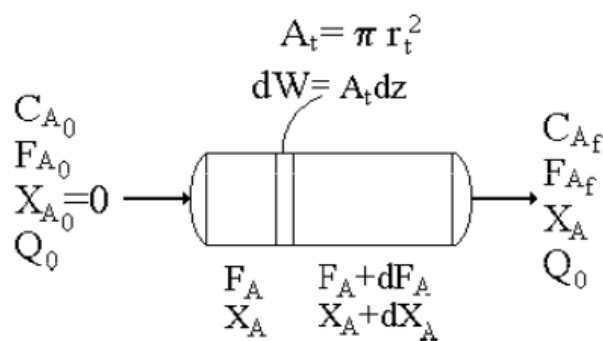


Figura 25. Esquema d'un reactor de flux de pistó



- Tots els elements del fluid presenten el mateix temps de residència (t).
- Les propietats del sistema canvien contínuament en la direcció del flux
- En la direcció axial (z) qualsevol porció de fluid es comporta com un sistema tancat en moviment
- El volum d'un element ha de perquè ser estrictament constant en la seva circulació al llarg del reactor, poden variar com a conseqüència de canvis de T o P.
- Pot donar-se una transferència de calor a través de les parets del sistema.

## 7.5. Reactors Air-Lift (ALRs)<sup>15</sup>

### 7.5.1. Introducció als ALR's.

Els Reactors tipus Air-lift (ALR) són aquells agitats pneumàticament emprant la injecció d'un component en fase gas (normalment aire, O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub>) per a garantir la mescla homogènia del sistema així com una correcta transferència de calor i massa de la fase gas-líquid.

En contraposició als tradicionals reactors de columna de bombolleig, el seu disseny específic fa que el moviment del fluid al llarg de tot el volum del reactor no sigui aleatori, sinó que aquest circula entre dues regions interconnectades denominades amb els termes anglosaxons riser i downcomer.

Aquests dos compartiments, un de pujada "riser" i el de descens "downcomer" estan connectats al fons per una regió o tub que permet la circulació del fluid entre ells, de la mateixa manera a la part superior del sistema consta d'un separador gas- líquid. En la Figura.21 adjunta es pot veure l'esquema d'un ALR amb els seus principals elements característics.

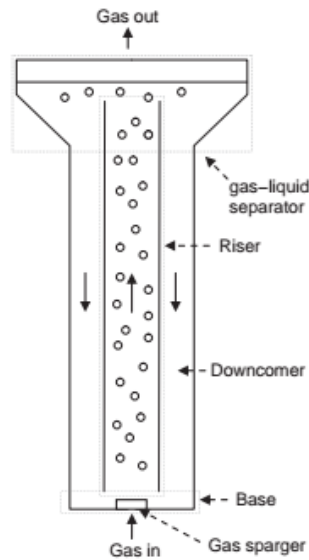


Figura 26. Esquema bàsic d'un reactor air-lift

En les condicions típiques de funcionament, el flux gasos s'injecta a la part baixa de la secció de tuberia vertical, sent eliminat del sistema en el desgasificador situat a la part superior. D'aquesta manera es genera un gradient de densitat mitjana entre fluid situat al riser i el del downcomer donant lloc a un corrent circular a través dels dos espais.

### 7.5.2. Tipus de reactors Air-Lift

Els reactors de configuració Air-lift són classificats de forma general per la seva estructura física, fent referència a la disposició del riser i el downcomer.

Per una banda es troben els de tipus Extern ( outer-loop ) on el riser i el downcomer estan construïts en forma de compartiments separats units per un tub horitzontal tant pel seu fons com per la seva part superior.

Per contra una configuració Interna (internal-loop) implica que el riser i el downcomer es troben dintre d'un mateix compartiment podent això si presentar diferents disposicions com poden ser dos cilindres concèntrics o una separació en forma d'aleta central.

Totes les configuracions tant internes com externes citades es mostra un esquema de la seva disposició riser-downcomer a la Figura.27.

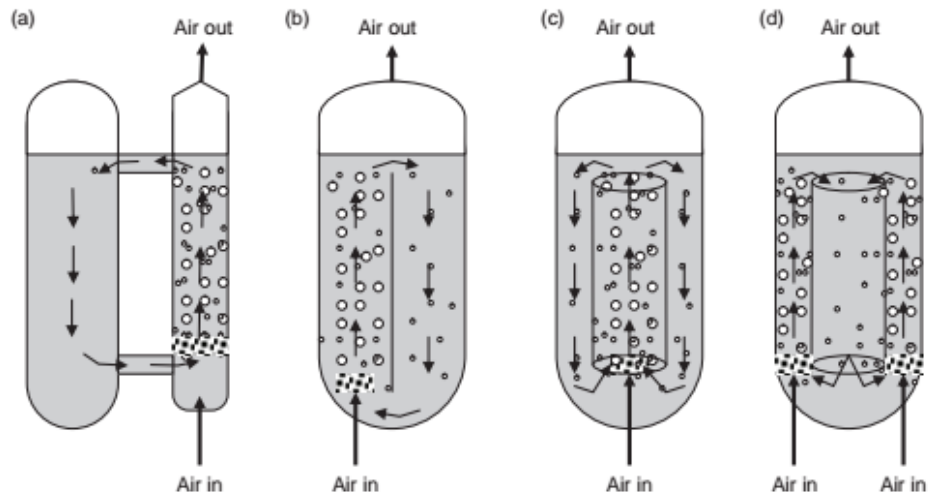


Figura 27. Tipus de reactors Air-lift en funció de la disposició del loop.



## 8. Disseny d'un Fotobioreactor Air-lift

### 8.1. Materials i equips

#### 8.1.1. Tipus de bioreactor i geometria

Per la seva major simplicitat tant constructiva com operativa es decideix optar per un reactor ALR de bucle intern amb tubs concèntrics verticals i dimensionament adaptat a les mesures d'un laboratori de química.

A part dels tub d'ascens (Riser) i el tub de descens (Downcomer) aquest estarà dotat d'un desgasificador en forma de campana en la seva part superior, dues tapes, una en cada un dels dos extrems i una estructura de suport exterior que garanteixi la seva estabilitat.

#### 8.1.2. Materials

Els materials emprats seran 3 diferents en funció dels components a tractar:

##### Vidre borosilicat 3.3 Duran®.

Material emprat per a la fabricació dels components en els quals la principal propietat necessària és la seva transparència, s'engloba en aquest conjunt el tub interior riser, el tub exterior downcomer i el desgasificador o campana.

Els avantatges competitius que ens porten a decidir l'elecció d'aquest material en front d'altres més econòmics i lleugers com ara un metacrilat, és la seva excel·lent residència als processos biològics, obtenint unes previsions de durabilitat de fins a 20 anys en front dels 4 estimats per un sistema realitzat en metacrilat.

##### Acer inoxidable 316L

Tota la part de components mecanitzats que estarà en contacte amb el medi de cultiu, serà fabricat en acer inoxidable del tipus 316L. En aquests conjunt s'hi ubiquen la tapa tant superior com inferior del sistema així com tot el conjunt de mordaces i cargols emprats en la subjecció del conjunt.

Algunes de les característiques que defensen la idoneïtat de l'elecció d'aquest material són:

En primer lloc té una alta càrrega de sals, el que li confereix una bona resistència a la corrosió, d'altra banda té una bona resistència (duresa), mal·leabilitat i soldabilitat. La seva composició

química és Crom, Níquel i Molibdè (al 2-3%), la presència d'aquest últim no únicament millora la resistència a la corrosió, sinó que en prevé l'aparició. [7]

Tal i com s'ha dit, té una gran resistència a l'acció corrosiva, ja sigui per picadura com per reactius químics o per atmosfera marina.

Com a avantatge extra, és un matèria de fàcil neteja i esterilització.

#### Perfils 45x45 alumini anoditzat.

Escollit per a la realització de l'estructura de suport, el perfil 45x45 ha estat triat sobredimensionant els requeriments del sistema per tal d'evitar uns càlculs detallats de resistència de l'estructura. Per altra banda aquest tipus de perfils utilitzats àmpliament en maquinaria industrial presenten facilitat de mecanització i muntatge a costos molt assequibles.

### **8.1.3. Sistema de control de la temperatura**

Si ve les algues poden sobreviure en condicions força variables i extremes de temperatura si que existeix un rang òptim per al cultiu d'aquests microorganismes. El creixement microalgal com tota reacció de biosíntesis tendeix a presentar una relació entre la velocitat de creixement i la temperatura d'augment gairebé exponencial de la primera fins assolir la temperatura òptima.

Per al cas de les microalgues nombrosos estudis coincideixen en senyalar que es possible la supervivència de la majoria d'espècies en un rang de temperatura comprès entre els 5-45°C, no obstant això de forma general es sol acotar aquest marge a un òptim delimitat entre els 20-25°C.

Per aquests motius és necessari dotar el disseny del FBR d'un sistema de control de temperatura.

L'instrumental escollit és una sonda de temperatura submergible, dotada d'un cable de llargada suficient per arribar a prendre mesures a mitja alçada del tub exterior downcomer.

Referència escollida: Pt 100 WIKA 14132820 - TF45 PT100/A/4-L/6MM/200°C/2.0M



Figura 28. Sonda de temperatura

#### 8.1.4. Sistema de control de pH

De forma general, la major part de les espècies de microalga conegudes poden sobreviure en medis que presenten un ampli marge de condicions de pH gràcies a la seva bona capacitat d'adaptació a medis extrems. No obstant això la majoria dels estudis coincideixen en definir un rang de pH entre 8-8,5 com l'òptim per a un correcte desenvolupament del cultiu.

Basant-nos en aquest fet, el control del pH no ha de suposar un factor crític en el funcionament del Fotobioreactor plantejat a més a més les reaccions de creixement d'aquests microorganismes no tendeixen a provocar variacions de pH en comparació a les presentades inicialment. No obstant això s'introduirà una sonda simple de PH en el sistema, amb la intenció bàsica d'utilitzar aquest indicador com una alerta de cara a possibles anomalies en el creixement microbià.

L'aparell seleccionat és una sonda simple de pH.

Referència: pH senzill marca metter-toledo.



Figura 29. Detall del pH-metre seleccionat

#### 8.1.5. Sistema d'automatització, PLC

Per tal d'automatitzar diverses operacions en el normal funcionament del reactor, es decideix implantar un sistema de control per PLC, escollint un PLC de la marca Siemens amb pantalla LED de 4" on visualitzar l'estat del sistema.

Aquest PLC rebrà una senyal provinent d'un temporitzador que cada 12 hores donarà l'ordre d'activar o desactivar el sistema d'il·luminació, donant lloc així a l'establiment d'un cicle circadiari en format 12:12h en el cultiu. Al mateix temps que gestiona la il·luminació l'aparell seleccionat actuarà sobre una electrovàlvula de doble via que canviarà la composició de l'entrada de component gasos en funció de les necessitats del sistema en cada una de les dos fases de la fotosíntesis.

#### 8.1.6. Vàlvules i ports

En funció de la seva aplicació es necessitaran les següents vàlvules:

Sistema de buidat: Estarà compost per una vàlvula de bola roscada a la tapa inferior del FBR, per tal de controlar el cabal de sortida de producte.

Regulació pressió entrada de gas: S'utilitzaran dos manoredactors per al control de la pressió de sortida tant de la botella d'aire com de la de la mescla de CO<sub>2</sub> al 3%



Electrovàlvula de doble via: Permetrà passar d'una entrada de corrent gasos amb contingut de  $\text{CO}_2$  ( fase lluminosa de la fotosíntesi) a un corrent d'aire pur (fas fosc de la fotosíntesi).

### 8.1.7. Sistema d'il·luminació

Per al sistema d'il·luminació s'optarà per la versatilitat d'una tira de LED's, la qual podrà ser tallada segons necessitat i fàcilment adherida a la paret exterior del FBR per mitjà d'un adhesiu comercial de doble cara. Aquest tipus d'il·luminació permetrà aplicar el flux lluminós necessari en la fase lumínica de la fotosíntesi sempre perpendicularment al cultiu al poder-se adaptar fàcilment a la geometria del sistema, afavorint així una major penetració, al mateix temps que es simplifica el disseny i s'abarateix el cost.



Figura 30 Bobina de llums LED

### 8.1.8. Difusor

S'ha definit per a la incorporació del corrent gasos al sistema l'ús d'un difusor de disc ceràmic de diàmetre 100mm , el qual permet l'entrada de cabals compresos entre 1-2L/s

És important no sobrepassar aquesta dimensió ja que per sobre d'aquest valor podria començar a produir-se un efecte negatiu en la recirculació del fluid ja que el diàmetre del difusor seria massa pròxim al del tub interior.

## 8.2. Paràmetres de disseny

### 8.2.1. Dimensionament<sup>11</sup>

Per al cas estudiat, al tractar-se d'una planta pilot, tot el seu dimensionat es farà pensant en poder encabir el sistema sense complicacions en el si d'un laboratori de química d'universitat. Per aquest motiu una de les principals limitacions serà l'alçada del sistema que en cap cas podrà superar valors més enllà de 2.5m, un cop el reactor es trobi ubicat en la seva estructura de suport, ja que aquesta és l'alçada estimada d'una sala de laboratori.

Si tenim en compte que el FBR estarà elevat aproximadament 0,5m del terra per tal de no presentar perjudici ergonòmic en l'operari i que per altra banda la seva altura total haurà de respectar un marge de aproximadament mig metre amb el sostre per permetre el lliure accés a tots els ports ubicats a la tapa superior, prenem per al disseny un valor màxim de  $H=1.3m$

Agafant com a referència les equacions de dimensionament establertes en [11], es podran aplicar un seguit de relacions que marcaran les mesures bàsiques del sistema.

El diàmetre del downcomer ( $D_d$ ) serà estimat prenent com a referència l'equació adjunta, on aplicarem el valor mig del rang comprès entre 3-6 , és a dir 4.5.

$$H = [3 - 6]D_d$$

Pel que fa al diàmetre del riser ( $D_r$ ) aquest es determinarà en base al  $D_d$  estimat anteriorment prenent com a referència una relació de 0.6, ja que aquesta és la configuració que presenta menys problemes de formació de bosses de gas que dificultin la recirculació del sistema.

$$D_r = [0.3 - 0.6]D_d$$

A partir de l'estimació del diàmetre del downcomer és calcula el volum total d'aquest ( $V_d$ ) que serà producte de l'àrea del downcomer ( $A_d$ ) per l'altura ( $H$ ), segons definit en l'equació següent.

$$V_d = \frac{\pi \cdot D_d^2}{4} \cdot H$$

Seguidament es calcularà el volum total del sistema ( $V_T$ ) com la suma dels volums de la base inferior ( $V_b$ ), del downcomer ( $V_d$ ) i de la campana superior o desgasificador ( $V_{ds}$ ) segons mostra següent.

$$V_T = V_b + V_d + V_{ds}$$

En el nostre cas  $V_b$  serà 0 en haver definit una base plana i la  $V_{ds}$  serà calculat anàlogament a l'equació definida per al càlcul de  $V_d$  substituint els valors de  $D$  i  $H$  pels paràmetres del desgasificador.

Un cop definit el volum total, s'estimarà el volum operatiu ( $V_{op}$ ) aplicant l'equació presentada a continuació, agafant el valor del rang superior de la relació, 0.9.

$$V_{op} = [0.7 - 0.9]V_T$$

Finalment calcularem l'àrea total exterior del sistema ( $A_T$ ) segons adjunta com el producte de l'alçada ( $H$ ) pel perímetre exterior del downcomer

$$A_T = H \cdot \pi D_d^2$$

Aquest valor d'àrea serà important més endavant en el càlcul dels paràmetres d'il·luminació.

### 8.2.2. Airejat

Es pot considerar que per un sistema com el descrit, la incorporació de fase gas ha d'estar compresa entre un rang de [0,5-2,5]vvm segons la bibliografia consultada[14]. En el cas tractat, per tal d'assegurar la correcta recirculació del fluid agafem un valor intermedi, en concret 1vvm. En l'apartat 8.3 de càlculs i resultats es desenvolupa el càlcul del cabal de gas i la seva velocitat d'ascens pel riser.

### 8.2.3. Transferència de calor

Coneixent que el rang òptim de cultiu per a l'espècie de microalga *Chlorella vulgaris* està situat entre els 20-25 °C, condicions que poden ser perfectament assimilables a les assumides com a standards en un laboratori de química, no és necessari entrar en consideració d'aquesta part de l'estudi ja que es pot assumir que les condicions de temperatura en les que operarà el sistema al llarg d'un cicle de cultiu es mantindran constants en tot moment amb els sistemes establerts per a la climatitzar de la sala de treball.

## 8.2.4. Il·luminació

La il·luminació juntament amb el sistema d'airejat són dos dels paràmetres claus a controlar a l'hora d'obtenir bons resultats en processos de cultiu de microalgues en aquests tipus de cultiu.

Per a poder estimar un valor per al sistema dissenyat, és pren com a referència l'estudi realitzat per Claudia Sacasa l'any 2013[6]. Els resultats que en ell s'exposen són els següents:

Espècies de cultiu: *Chlorella vulgaris*

Volum d'operació: 10L

Intensitat lumínica: 4000 Lux

Cicle circadiari: 12:12h

Coneguts aquest valors, es realitzarà un escalat dels valors presentats al volum del sistema dissenyat, mantenint el mateix cicle circadiari de 12:12h ja que aquest és l'òptim per al creixement de la *Chlorella vulgaris*. Així doncs s'aplicarà un factor d'escalat x10 respecte a les dades de l'estudi de referència.

## 8.3. Càlculs i resultats

### 8.3.1. Valors numèrics

#### 8.3.1.1. Dimensions constructives

Aplicant valors numèrics al conjunt d'equacions presentades en l'apartat 8.2.1, es determinen els paràmetres bàsics per a la definició estructural del fotobioreactor Air-lift a escala pilot proposat.

En la taula següent es mostra un resum de les principals dimensions calculades.

Paràmetre	Definició	Unitats	Valor
H	Altura del Downcomer	m	1.3
D <sub>d</sub>	Diàmetre Downcomer	m	0.3
D <sub>r</sub>	Diàmetre Riser	m	0.18
V <sub>d</sub>	Volum Downcomer	m <sup>3</sup>	0,09
V <sub>T</sub>	Volum total del reactor	m <sup>3</sup>	0,12
V <sub>op</sub>	Volum d'operació	m <sup>3</sup>	0,11
A <sub>T</sub>	Àrea total del Reactor	m <sup>2</sup>	1,22

### Càlcul sistema airejat

Partint del valor d'1 vvm prèviament definit, multiplicant aquest valor pel V<sub>op</sub> del nostre reactor obtenim un cabal de gas de 1,8 L/s, valor plenament assumible pel difusor escollit.

Si ara passem a calcular la velocitat del gas, aplicant la següent expressió:

$$U_{Gr} = \frac{QmRT}{h_L A_r \rho_L g} \ln\left(1 + \frac{\rho_L g h_L}{P_h}\right)$$

On:

Qm: Cabal molar de gas (mols/s)

$\rho_L$ : densitat del medi ( 1000kg/m<sup>3</sup>)

h<sub>L</sub>: alçada de la columna de líquid

A<sub>r</sub>: Àrea del riser (m<sup>2</sup>)

g: gravetat (m/s<sup>2</sup>)

U<sub>Gr</sub>: velocitat d'ascens del gas en el riser (m/s)

Substituint numèricament en l'equació anterior, s'obté un valor de  $U_{Gr} = 0,426 \text{ m/s}$ , valor dins del rang normal segons bibliografia consultada.

### **Càlcul de la il·luminació**

En base a la referència ja citada en l'apartat 8.2.6, s'aplicarà un factor d'escalat ( x11), basat en la relació de  $V_{op}$  a les dades d'aquest estudi obtenint així els següents paràmetres:

Volum del sistema : 110L

Cicle circadiari: 12:12h

Intensitat lluminosa(I): 44000Lux

Un cop definits aquests valors anem a determinar la quantitat de llums LED que necessitem en el cas proposat:

Emprarem una tira de LED's comercial ref: LED IC 230V 720W de 5m de longitud la qual assumim que presenta una  $I=24000 \text{ lm}$ . [8]

Aplicant el següent factor de conversió determinarem la longitud total de tira de LED necessària:

$$44000 \text{ Lux} \cdot 1,22 \text{ m}^2 \cdot \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ Lux} \cdot \text{ m}^2} \cdot \frac{5 \text{ m tira LED}}{24000 \text{ lm}} = 11,2 \text{ m de tira de LED}$$

Repartirem aquests 11,2m de tira de LED necessaris en 11 tires verticals d'1m de longitud, adherides amb ajuda de cinta adhesiva de doble cara a la paret exterior del FBR.

### **Càlcul producció anual**

Per a poder calcular la quantitat de biomassa de microalga en Kg/any que podríem potencialment obtenir en un sistema com el plantejat, en primer lloc ens caldrà definir la quantitat de dies que aquest estarà en funcionament durant el transcurs d'un any. En tractar-se d'un projecte pensat i dissenyat per adaptar-se a un laboratori universitari agafarem un valor anual de 220 dies operatius, resultat d'eliminar els caps de setmana i dos mesos amb el reactor aturat per manteniment i altres causes. També es definirà un treball per cargues de 6 dies, durada d'un procés de fermentació.

Per realitzar una aproximació a la capacitat productiva del sistema dissenyat, prendrem com a referència l'estudi realitzat per Claudia Sacasa l'any 2013[8].

Segons les dades experimentals presentades, si apliquem un medi de cultiu en condicions basals sense sistemes aportació extra de carboni, limitant aquest factor a una cinètica:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)}{t - t_0}$$

On :

$\mu$  és el parametre de creixement característic ( $d^{-1}$ )

$X_0$  és la concentració inicial de microalga en el sistema en (g/L)

$X$  és la concentració a un cert temps  $t$  de microalga en el sistema (g/L)

Segons les dades de l'article subscrit, partim d'unes condicions inicials:

$$X_0 = 0,05 \text{ g/L}$$

Aquesta estudi dóna com a paràmetre de creixement experimental de valor  $\mu = 0,3 \text{ d}^{-1}$ .

Substituint en l'equació plantejada anteriorment els valors especificats, obtenim una concentració final de microalgues ( $x$ ) de 0,30g/L.

Si multipliquem el valor de la concentració final pel  $V_{op}$  del nostre sistema obtenim 33,3g per lot. Al cap d'un any s'obtidrien un total de 1,464 Kg de biomassa de microalga.

Val a dir que diversos investigadors avalen que en el cas de subministra una font extra de carboni, com per exemple en forma de glucosa, la productivitat pot arribar a multiplicar-se 10 o 20 vegades. [10]

### 8.3.2. Estructura i modelatge 3D<sup>9</sup>

Seguidament es mostra detall gràfic del FBR-ARL dissenyat segons els paràmetres i dimensions detallats en apartats anteriors.

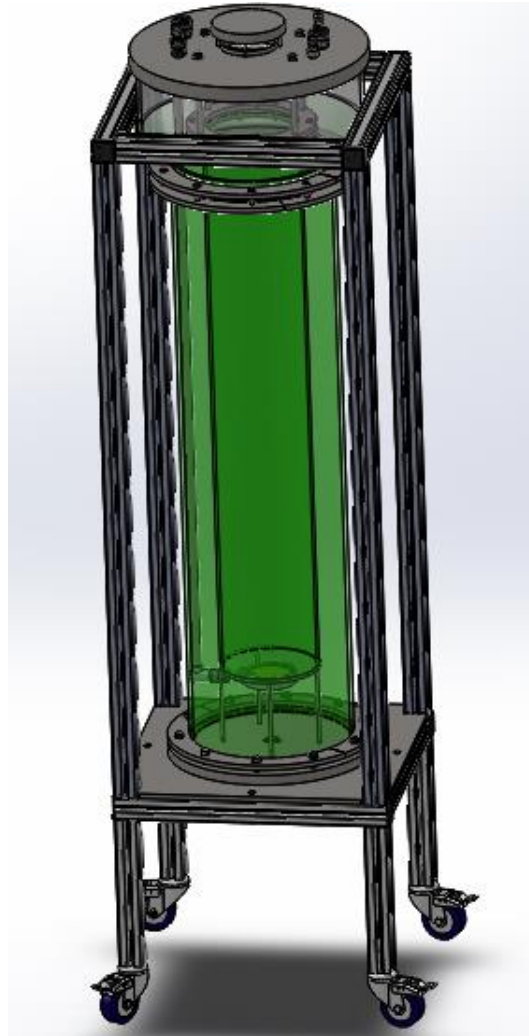


Figura 31. Vista general del FBR Air-lift dissenyat

L'objectiu bàsic d'aquest disseny és donar forma a l'idea d'un sistema tancat, de volums coneguts i paràmetres controlables destinat a una producció d'alta puresa de diferents espècies de microalga utilitzades a posteriori en el camp de la recerca biotecnològica.

En totes les etapes del disseny s'ha buscat definir un reactor constructivament senzill de cara a reduir al màxim el seu cost així com per facilitar a l'operari tant el seu control operatiu com la seva neteja. Per altra banda la seva versatilitat fa que es pugui cultivar en el seu interior una gran varietat d'espècies de microalga simplement adaptant el cabal d'entrada de gas o la intensitat de la il·luminació.



També citar que tot aquest treball gràfic s'ha pogut realitzar gràcies al programari SolidWorks® *Premium 2015*, software amb el qual s'ha realitzat el disseny 2D/3D del sistema.

Seguidament es mostrarà les diferents peces que componen el reactor així com un detall general del seu muntatge. Tot i així en l'Annex A es poden trobar plànols detallats de cada un dels components de cara a la seva mecanització a més a més de plànols generals del muntatge on es defineixen les cotes bàsiques per a la seva correcta unió.

### 8.3.2.1. Components

#### RISER I DOWNCOMER

Per les seves dimensions representen els dos components més destacables del sistema. Situats vertical i concèntricament, el Riser (L=1100mm, D=180mm) i el Downcomer (L=1200mm, D=300mm) permeten la generació d'un flux de líquid entre ells per tal de dotar al reactor d'un sistema d'agitació no mecànic. Per l'altra la seva transparència és una característica clau, ja que han de permetre el pas de la llum aplicada exteriorment en forma de cinta de LEDs fixada a la paret exterior del Downcomer per mitja d'un adhesiu de doble cara.

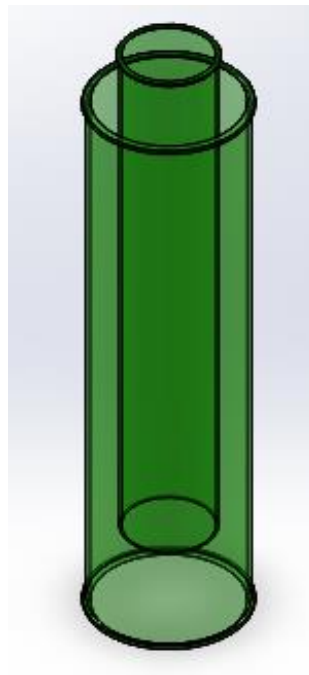


Figura 32. Renderitzat dels tubs riser i downcomer

Cal remarcar que tot i semblar tubs llisos, tant el riser com el downcomer han de presentar un perfil exterior superior al seu diàmetre en cada un dels dos extrems de cara a permetre el seu posterior acoblament amb els altres elements del sistema.

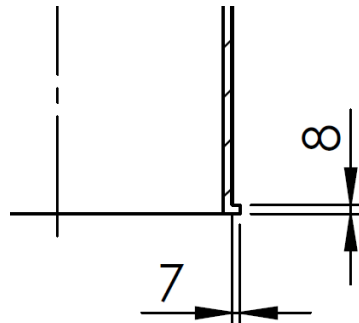


Figura 33. Detall del perfil exterior del downcomer

### DESGASIFICADOR

És la part que corona el downcomer, també conegut com a campana, destaca per ser com aquest últim fabricat amb vidre borosilicat de cara a dotar-lo d'una transparència suficient per permetre la incidència de la llum externa sobre el cultiu. Respecte al diàmetre del downcomer presenta un eixamplament a partir del primer terç de la seva altura on el diàmetre augmenta fins a 440mm.

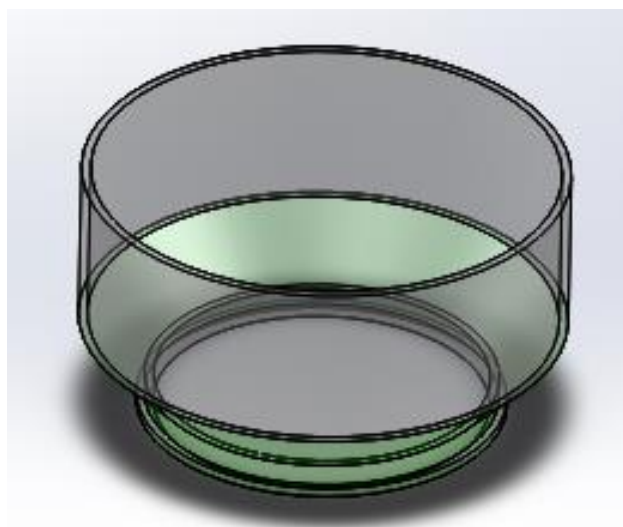


Figura 34. Detall del desgasificador o campana

Aquest augment de diàmetre respecte el downcomer busca dos objectius, en primer lloc afavorir la recirculació del líquid que puja impulsat des del riser gràcies a la columna gasosa ascendent i que posteriorment baixarà a causa de la diferència de pressions pel downcomer. En segon lloc i no per això menys important, es busca minimitzar la formació de la capa d'espumes que es generen en la separació gas-líquid en la superfície superior del líquid.

### BASE INFERIOR

Actua com a tancament del Tub exterior downcomer per la seva part inferior. Constructivament destaca la corona circular en Acer Inox 316L de 20mm d'espessor sobre la qual es mecanitzen per una banda una rosca central destinada a la fixació d'una vàlvula de bola per la buidat del sistema i per l'altra 10 forats de diàmetre 8mm travessants en la seva totalitat de cara a realitzar la unió de la base amb el downcomer i posterior fixació d'aquest conjunt a l'estructura de suport.

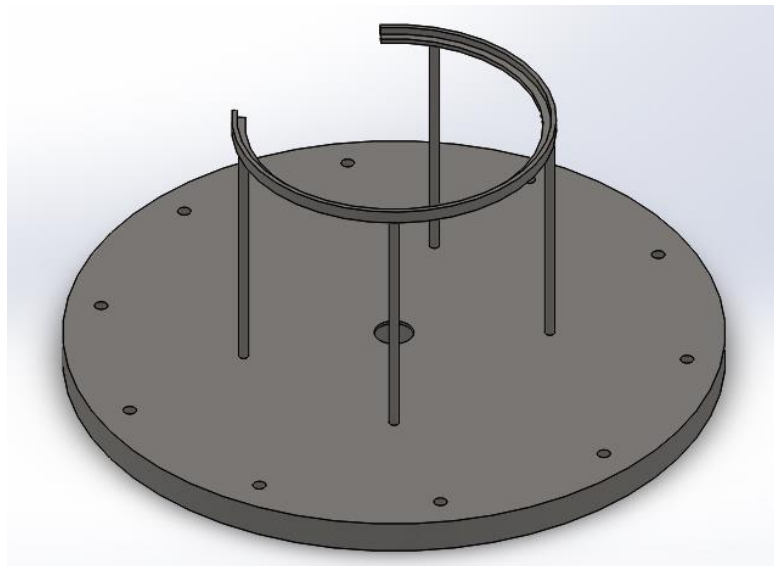


Figura 35. Detall de la base inferior

A part del mecanitzat anterior es fixa sobre la base per encastament 4 varetes cilíndriques també d'acer Inox360L a la part superior a les quals es fixa altre cop per encastament una corona que busca sostenir, facilitar i dirigir l'acoblament del riser.

Aquesta corona presenta una part oberta per tal de permetre el posicionament del sistema d'airejat al mateix temps que s'introdueix el riser per la part superior del tub exterior.

## TAPA SUPERIOR

Aquest element realitza la funció de protegir el cultiu del medi exterior per la seva part superior. Mecanitzat sobre un placa d'acer Inox316L de 10mm d'espessor consta d'una placa plana circular al voltant de la qual es fixa una corona de 20mm d'alçada i diàmetre interior igual al del desgasificador per tal de ajustar el tancament sobre aquest.

Sobre la planxa plana superior es mecanitzen diferents perforacions, 6 de roscades on es fixen els diferents ports d'entrada. En el disseny inicial 3 estan ocupats per racors d'espiga un d'ells destinat a l'entrada del sistema d'airejat i la resta destinats a possibles incorporacions de nutrients en funció del cultiu desitjat.

Els altres tres ports, presenten racors femella de connexió ràpida com a tancaments, tot i que l'idea principal seria ocupar aquests amb l'entrada de dispositius de control de PH, temperatura o una sonda òptica per al càlcul de la concentració de microorganismes.

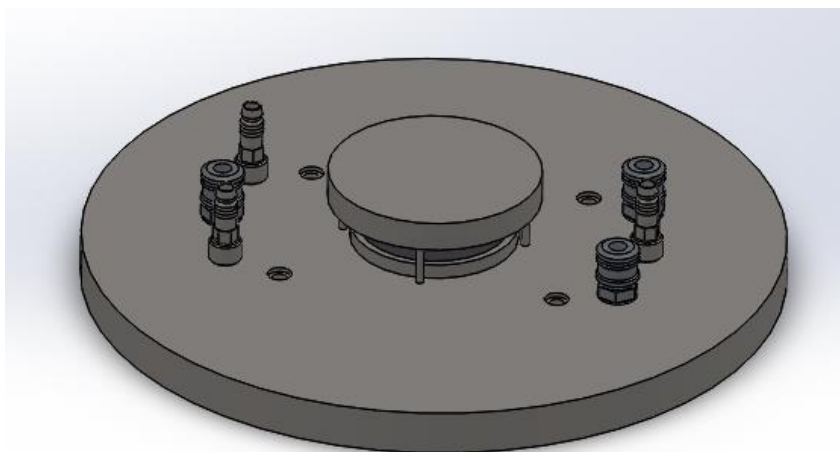


Figura 36. Detall tapa superior

A part dels ja citats, s'obra sobre la placa superior un gran orifici central que ha de permetre tant la sortida lliure del gas que puja pel raiser com la introducció d'un sistema de neteja a pressió sense necessitat de desmuntar el conjunt del reactor.

Al voltant d'aquest orifici i per tal d'evitar la caiguda de brutícia i elements perjudicials per al sistema és fixen per encastament 4 passadors roscats encarregats de sostenir sobre ells una petita tapa mòbil. En cas de requerir un aïllament total del medi exterior es substituirà aquesta

tapa superior per un filtre el qual serà collat contra la base amb l'ajuda d'aquests passadors i 4 cargols hexagonals de M6.

També citar els 4 forats travessants on es fixaran els 4 passadors encarregats de sostindre el Riser .

### SISTEMA D'AIREJAT

Situat en la part inferior del Riser el sistema d'airejat es l'encarregat d'introduir el component gasos al sistema així com generar la recirculació del fluid.

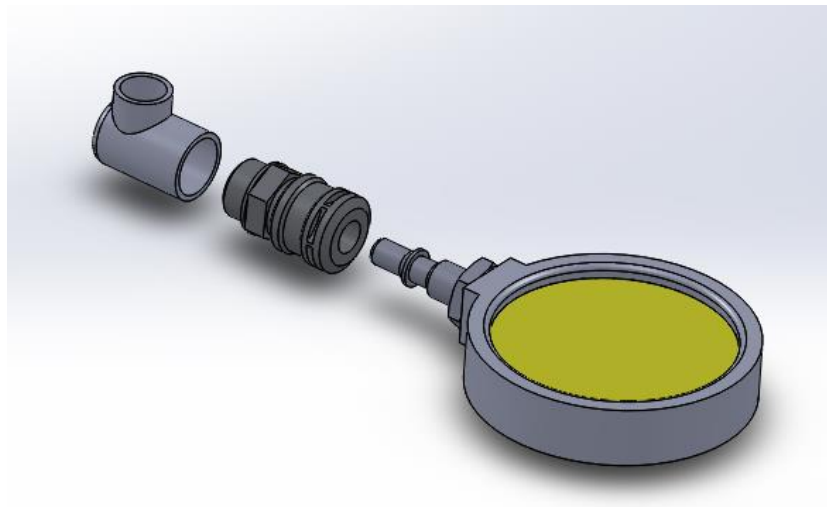


Figura 37. Detall del sistema d'airejat per disc ceràmic

Aquest sistema estarà compost bàsicament per tres elements, un tub 'acer inox316L, un colze també d'aquest material, un port de connexió ràpida i un difusor de disc ceràmic de diàmetre D100mm com a màxim de cara a no obstaculitzar la recirculació de la fase líquida a través del fons del Riser.

### ESTRUCTURA DE SUPORT

La funció d'aquesta part és sostenir verticalment el sistema sense risc de caiguda, al mateix temps que eleva el FBR a una alçada ergonòmicament correcta per que l'operari realitzi el seu maneig.

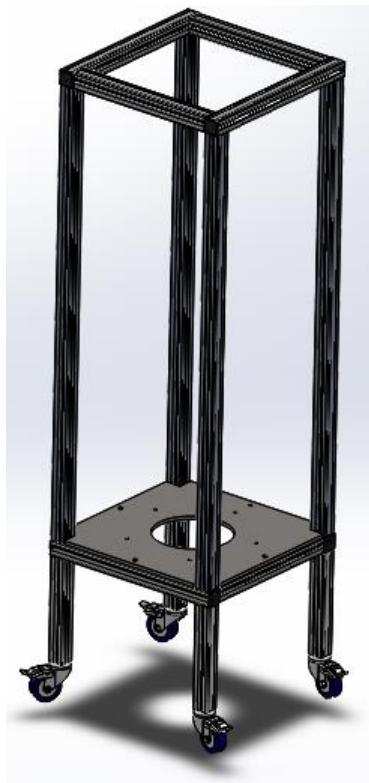


Figura 38. Detall de l'estructura de suport

L'estructura realitzada amb perfil·laria comercial d'alumini 45x45mm està dotada de 4 rodes giratòries industrials amb fre per tal de permetre un fàcil desplaçament del sistema.

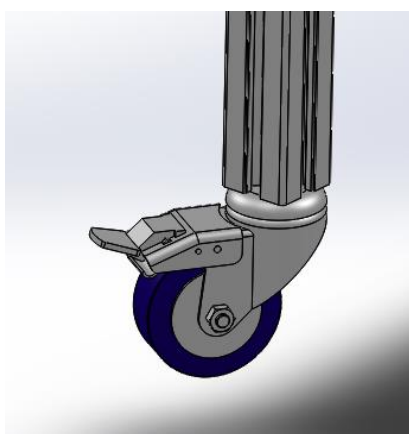


Figura 39. Detall renderitzat rodes giratòries amb fre

Els perfils d'alumini vistos són protegits amb 8 tapetes plàstiques comercials estàndard per tal d'evitar el risc de talls i lesions.

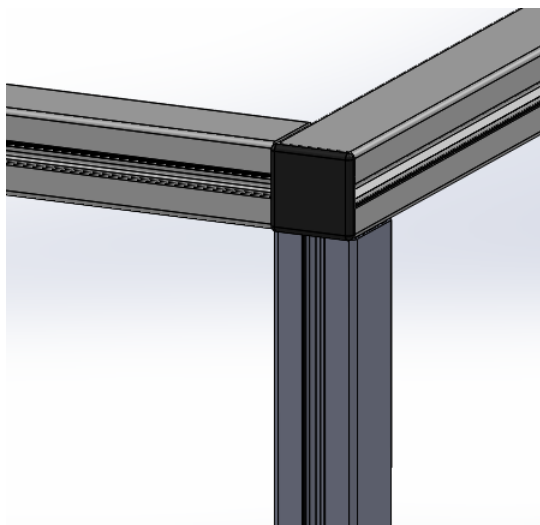


Figura 40. Detall tapetes protecció perfils

L'únic element de l'estructura que requereix de ser mecanitzat és una placa plana de 10mm d'espessor en acer Inox316L que suportarà el FBR sobre l'estructura, permetent també així la seva fixació.

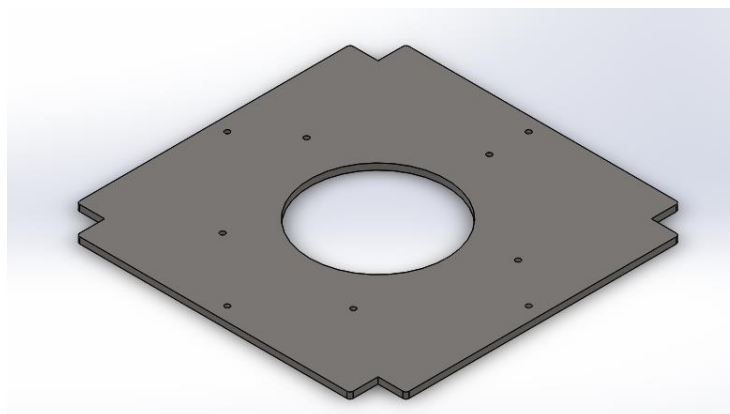


Figura 41. Detall renderitzat xapa base suport

### 8.3.2.2. Muntatge dels components

A l'hora de realitzar el muntatge del sistema, la primera acció consisteix a fixar tant el riser com el sistema d'airejat a la tapa superior del reactor.

Per dur a terme la unió del riser vers la tapa necessitarem de 4 corones semicirculars mecanitzades a les dimensions requerides segons plànols (Annex A) així com una junta de material polimèric que garanteixi la correcta adherència del tub de vidre borosilicat contra la mordassa d'acer inoxidable. Un cop feta la unió de la doble corona amb el riser, 4 cargols Allen M10x180 fixaran el subconjunt anterior a la tapa del reactor. Seguidament es mostra detall d'aquest acoblament.

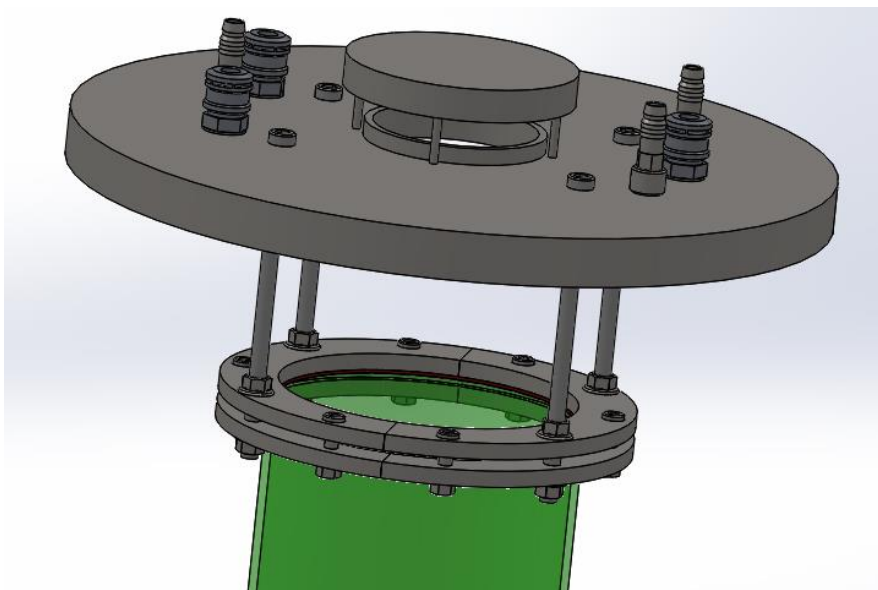


Figura 42. Renderitzat acoblament del riser a al tapa superior

El mateix concepte de subjectió per mitja de 4 mordaces en forma de semicorona unides entre elles per cargols Allen de M8x40 és utilitzat a la unió entre el downcomer i el desgasificador.



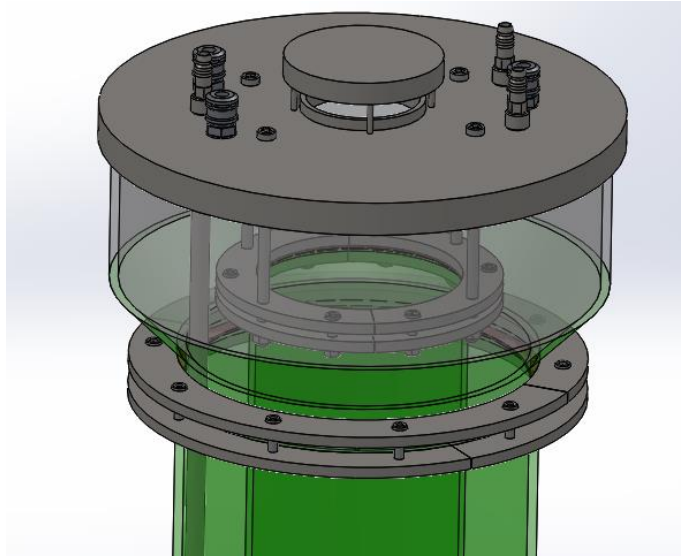


Figura 43. Detall de la unió del downcomer ab el desgasificador

El subconjunt tapa superior més riser, també té fixat el sistema d'airejat. El sistema format per un difusor de disc ceràmic situat sota el riser, està connectat amb l'exterior per mitjà d'un tub d'acer inoxidable que recorre tot el reactor en vertical, estant roscat en la seva part superior a un espiga de contacte ràpid. Eliminant el tub exterior en el renderitzat, és fàcil veure detall del muntatge descrit.

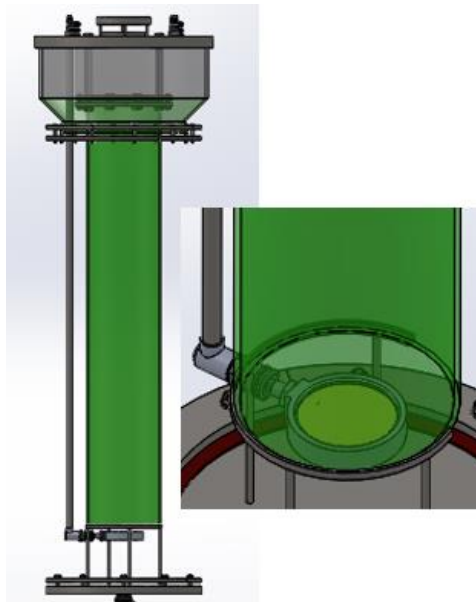


Figura 44. Detall acoblament del sistema d'airejat

Finalment la unió del conjunt del reactor amb l'estructura de suport es realitza per mitjà de la base del FBR amb un sistema de mordaces idèntic a l'emprat en els dos casos descrits anteriorment. Aplicació d'una unió per mitja de corones semicirculars comprimides contra la part volant exterior del tub, utilitzant una junta plana per garantir l'estanqueïtat del reactor.

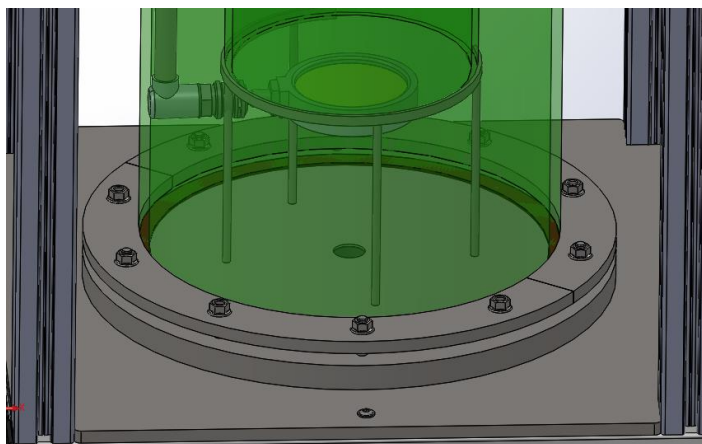


Figura 45. Detall tancament inferior i fixació al suport

La vàlvula de bola definida per al seu buidat serà roscada a la base inferior del FBR, ajustant la seva completa estanqueïtat per mitja d'un teflonat de la rosca.

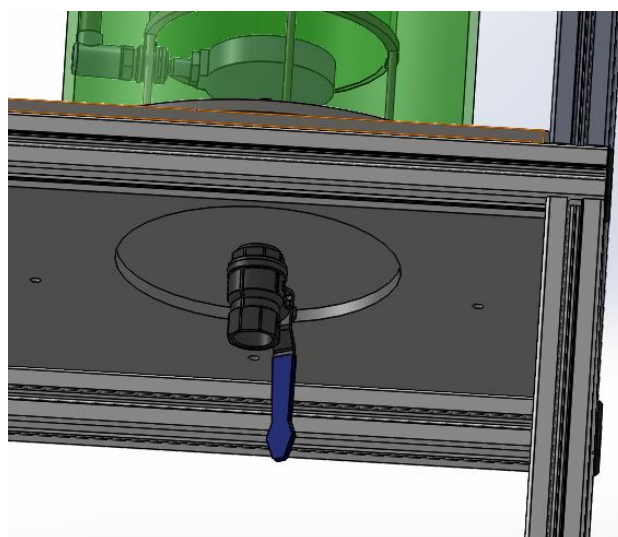


Figura 46. Detall del sistema de buidat, vàlvula de bola.

Finalment el conjunt FBR-ARL més la seva estructura de suport, presenten el següent dimensionat general exterior, cotes que ens ajuden a poder trobar un correcte emplaçament per al sistema, garantint un metre d'espai propi a tot el seu perímetre.

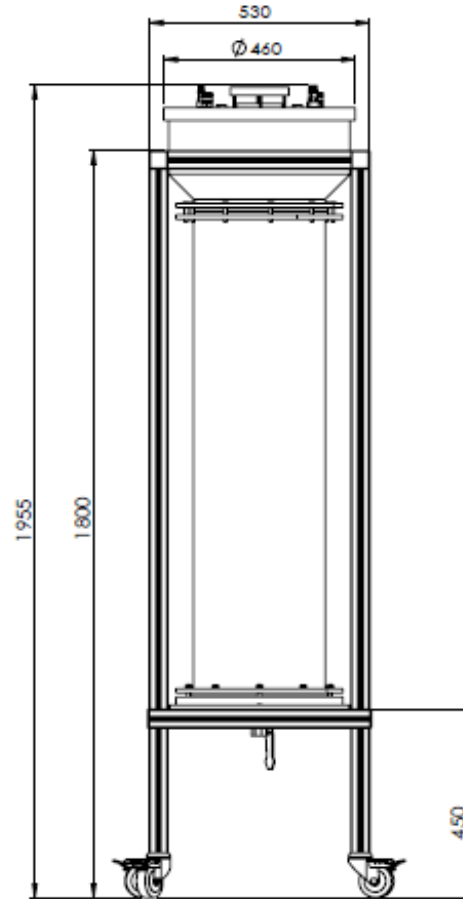


Figura 47. Detall del dimensionat exterior del FBR amb el suport



## 9. Condicions d'operació i seguretat

En aquest apartat es busca definir els hàbits, normes de conducta i prevenció que haurà de seguir tota persona que prengui contacte amb el fotobioreactor així com les condicions a complir per l'emplaçament de l'equip de cara a evitar o minimitzar el risc d'accident i les seves conseqüències.

### 9.1. Seguretat i normativa de l'operari

Les mesures de seguretat que haurà de seguir tot tècnic que interaccioni amb el sistema en condicions normals d'operació seran principalment relacionades amb la vestimenta a respectar per aquest. En base a això la indumentària requerida serà l'associada típicament a un laboratori químic, sent necessari l'ús de bata, guants nitril i ulleres de protecció.



Figura 48. Sistemes genèrics de protecció en un laboratori de química

En el cas de requerir-se accedir al sistema durant el cicle de cultiu per tal de extreure una mostra d'aquest o corregir qualsevol tipus d'anomalia (acumulació de biomassa, obstrucció del difusor, etc) havent-se d'obrir el reactor per la seva part superior, l'operari farà ús d'una còfia de protecció que li cobreixi els cabells i una mascareta per tal de no contaminar el cultiu.



Figura 49. Detall de la còfia i la mascareta proposades

Al tractar-se d'una disseny a escala pilot les seves dimensions reduïdes no necessiten d'estructures elevades per tal d'operar amb ell, no obstant durant l'operació de neteja entre cargues és necessari enfilar-se a una escala d'1m aproximadament per tal de poder accedir a la boca superior amb una equip d'aigua a pressió. En aquest cas es recomana la presència d'un segon operari que vetlli per la seguretat del que es trobi realitzant l'operació de neteja.

## 9.2. Emplaçament de la Instal·lació

**Ventilació:** Serà precís de dotar la sala on s'emplaci el fotobioreactor d'un sistema de ventilació per tal de no permetre acumulacions de CO<sub>2</sub> fins a concentracions de risc com a conseqüència de la desgasificació lliure del sistema a l'ambient. Altes concentracions de diòxid de carboni poden ocasionar sobre les persones exposades des de vertigen o mal de cap fins a pèrdua de coneixement en els casos més extrems. Veure fitxa de seguretat del CO<sub>2</sub> (Annex A).

També en favor d'un bon sistema de ventilació es troben les olors desagradables que generen aquest tipus d'instal·lacions, semblant al que es pot percebre en llocs naturals d'aigües estancades.

## 10. Estudi Econòmic

Com en qualsevol projecte, l'estudi econòmic d'aquest és una part bàsica per a poder posar en valor el sistema dissenyat. No en va l'adquisició de determinats components pot estar estretament vinculat a un límit de pressupostari prèviament fixat.

En el cas del sistema estudiat, s'ha optat per subdividir l'estudi de la inversió a realitzar per construir aquest pressupost en dos partides clarament diferenciades.

Per una banda s'ha valorat el cost de l'estructura de suport que eleva el fotobioreactor al mateix temps que en garanteix la seva verticalitat.

Per l'altra s'ha detallat per materials, components, costos de mà d'obra (disseny, mecanització i muntatge) la construcció detallada del sistema, des de l'estructura física com els sistemes de control o l'adquisició dels compostos gasos.

Un cop fet l'estudi de cada part, els valors obtinguts, IVA no inclòs, són:

ESTRUCTURA DE SUPORT	935,41€
FBR AIR-LIF ESTRUCTURA	6715,98€
<b>TOTAL</b>	<b>7651.39€</b>

Seguidament es mostra major detall dels dos subconjunts estudiats.

FBR AIR-LIFT Estructura						
MATERIAL						
Descripció	Preu	Un.	Distancia	Un.	Quant.	Cost (€)
Tub Inox 316L D16	25,5	€/m	1,3	m	1	33,15
Varilla Inox 316L D6	16,5	€/m	0,15	m	4	9,90
Xapa Inox 316L 1000x1000x10	4,5	€/Kg	55	Kg	-	247,50
Xapa Inox 316L 1000x1000x20	9	€/Kg	22	Kg	-	198,00
<b>TOTAL Mateiral</b>						<b>488,55</b>
COMPONENTS COMERCIALS ESTRUCTURA						
Descripció	Preu	Un.	Distancia	Un.	Quant.	Cost (€)
Tub de vidre borosilicat D180 x1100	137,9	€/u	-	-	1	137,90
Tub de vidre borosilicat D300x1200	344	€/u	-	-	1	344,00
Desgasificador vidre borosilicat 3.3	255	€/u	-	-	1	255,00
Difusor disc ceràmic D100	11,22	€/u	-	-	1	11,22
<b>TOTAL Components comercials</b>						<b>748,12</b>
VÀLVULES I PORTS						
Descripció	Preu	Un.	Distancia	Un.	Quant.	Cost (€)
Vàlvula de bola	14,54	€/u	-	-	1	14,54
Espiga contacte ràpid Ac Inox	5,77	€/u	-	-	3	17,31
Racor Femella Ac Inox	12,45	€/u	-	-	4	49,80
<b>TOTAL Vàlvules i ports</b>						<b>81,65</b>
FERRETERIA						
Descripció	Preu	Un.	Distancia	Un.	Quant.	Cost (€)
Cargol Allen Inox 360L M8x40	0,35	€/u	-	-	21	7,35
Cargol Allen Inox 360L M8x50	0,44	€/u	-	-	5	2,20
Cargol Allen Inox 360L M10x180	1,85	€/u	-	-	4	7,40
Rosca hexagonal autoblocant M8	0,19	€/u	-	-	10	1,90
Rosca hexagonal M8	0,12	€/u	-	-	12	1,44
Rosca hexagonal autoblocant M10	0,21	€/u	-	-	8	1,68
<b>TOTAL Ferreria</b>						<b>21,97</b>
MECANITZAT COMPONENTS						
	Preu	Un.	Temps	Un.	Quant.	Cost
Tapa superior	30	€/h	2	h	1	60,00
Base inferior	30	€/h	1,5	h	1	45,00
Mordaga riser	30	€/h	0,2	h	4	24,00
Mordaga Downcomer 1	30	€/h	0,22	h	4	26,40
Mordaga Downcomer 2	30	€/h	0,25	h	2	15,00
<b>TOTAL Mecanitzat components</b>						<b>170,40</b>
SISTEMES DE CONTROL I IL·LUMINACIÓ						
	Preu	Un.	Temps	Un.	Quant.	Cost
Tira LEDs	8,93	€/h	-	-	7	62,51
Manoreductors	107,69	€/h	-	-	2	215,38
Sonda de pH	89,9	€/h	-	-	1	89,90
Sonda de temperatura	10,9	€/u	-	-	1	10,90
Convertidor de senyal	42,6	€/u	-	-	1	42,60
PLC Siemens amb pantalla LED 4"	119	€/u	-	-	1	119,00
Electrovàlvula doble via	165	€/u	-	-	1	165,00
<b>TOTAL Sistemes control i il·luminació</b>						<b>705,29</b>
COMPOSTOS						
	Preu	Un.	Temps	Un.	Quant.	Cost
Ampolla 50L Aire comprimit	150	€/u	-	-	1	150,00
Ampolla 50L CO2 al 3%	150	€/u	-	-	1	150,00
<b>TOTAL Ampolles de gas</b>						<b>300,00</b>
TEMPS DE TREBALL						
Ensamblatge Final ( op. Mecànic)	30	€/h		20 h		600
Programació PLC	40	€/h		8 h		320
Disseny (Enginyer júnior)	15	€/h		240 h		3600
<b>TOTAL temps disseny i muntatge</b>						<b>4200</b>
<b>TOTAL FBR AIR-LIFT ESTRUCTURA</b>						<b>6715,98</b>



<b>ESTRUCTURA DE SUPORT</b>						
<b>MATERIAL</b>						
<b>Descripció</b>	<b>Preu</b>	<b>Un.</b>	<b>Distància</b>	<b>Un.</b>	<b>Quan. (u)</b>	<b>Cost (€)</b>
Perfil 45x45 alumini BOSCH	12,11	€/m	1,3	m	4	62,97
Perfil 45x45 alumini BOSCH	12,11	€/m	0,3	m	4	14,53
Perfil 45x45 alumini BOSCH	12,11	€/m	0,53	m	4	25,67
Perfil 45x45 alumini BOSCH	12,11	€/m	0,44	m	4	21,31
Tapa de gomma 45x45	0,55	€/u	-	-	8	4,40
Roda giratoria D80 amb fre	11,05	€/u	-	-	4	44,20
Xapa Inox 316 500x500x10*	4,5	Kg/u	19,75	Kg	1	88,88
Conector perpendicular, 10mm	1,81	€/u	-	-	24	43,44
<b>TOTAL Material</b>						<b>305,41</b>
<b>TEMPS DE TREBALL</b>						
<b>Descripció</b>	<b>Un.</b>	<b>Temps</b>	<b>Un.</b>	<b>preu</b>	<b>Cost (€)</b>	
Mecanitzat i montatge	h	6	€/h	30	180	
Disseny 2D/3D	h	10	€/h	45	450	
<b>TOTAL temps treball</b>					<b>630</b>	
<b>TOTAL ESTRUCTURA</b>						<b>935,41</b>



## 11. Estudi ambiental

Per realitzar l'estudi de l'impacte ambiental, s'ha decidit efectuar una avaluació de les emissions que produirà l'operació del fotobioreactor dissenyat i les emissions de CO<sub>2</sub> que es produiran a causa de la il·luminació LED del sistema.

### 11.1. Càlcul de les emissions del procés

En primer lloc es calculen les emissions de CO<sub>2</sub> que generarà l'ús del fotobioreactor. A tal efecte es comptabilitzarà la lliure emissió de CO<sub>2</sub> produïda durant les 12 hores diàries de la fase lumínica de la fotosíntesis, assumint com a simplificació de càlcul que tot el CO<sub>2</sub> (3% en massa del flux total de gas) introduït en el sistema d'airejat és expulsat lliurement a l'atmosfera.

$$1.5\text{L/s} \cdot 0,03 \cdot 220 \cdot 12 \cdot 3600 = 570240 \text{ L CO}_2 = 1034 \text{ kg CO}_2$$

Si fem el càlcul del consum dels LED's al llarg d'un període anual:

$$720 \text{ W} \cdot 220 \text{ dies} \cdot 12 \text{ h} = 1900,8 \text{ kWh}$$

D'acord amb l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic [4], per cada kWh de consum elèctric, es generen 302 g CO<sub>2</sub>:

$$1900,8 \text{ kWh} \cdot 302 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}} \cdot \frac{1 \text{ kg CO}_2}{1000 \text{ g CO}_2} = 574,04 \text{ kg CO}_2$$

Si es calcula la generació de CO<sub>2</sub> en unitats específiques de producte:

$$\frac{1608,04 \text{ kg CO}_2/\text{any}}{1,464 \text{ kg algues}/\text{any}} = 1098 \text{ kg CO}_2/\text{kg alga}$$

### 11.2. Ecoindicador 99

En segon lloc, per avaluar les implicacions ambientals del bioreactor ens basem en el càlcul d'unitats d'impacte ambiental presentades per Ashby [5].

L'ecoindicador és una eina que indica l'impacte ambiental unitari d'un material, un procés, un medi de transport, l'ús d'un combustible o l'impacte ambiental del rebuig d'un material. Les

categories descrites creen diferents grups (“Ecoindicadors”), totes elles estan estretament vinculades amb les diferents etapes del cicle de vida del producte o material.

Els ecoindicadors 99 es calculen amb milipunts, els quals estan relacionats amb els kg de material, i expressen l'impacte del cicle de vida del material o producte. Aquest mètode va ser ideat per Goedkoop a finals del segle passat.

A continuació es mostren els ecoindicadors per als elements constitutius del Fotobioreactor estudiat:

Component	Material	Quantitat	Ecoindicador	TOTAL -milipunts-
Riser	Vidre Borosilicat	7,32kg	129/kg	944,28
Downcomer	Vidre Borosilicat	21,25 kg	129/kg	2741,25
Desgasificador	Vidre Borosilicat	5,23 kg	129/kg	674,67
Base inferior	AC316L	19,46 kg	910/kg	17708,6
Tapa	AC316L	22.04 kg	910/kg	20056,4
Mordaces	AC316L	11.6 kg	910/kg	10,556
Cargol	AC316L	1,78 kg	910/kg	1619,8
Rosca	AC316L	0,24 kg	910/kg	218,4
Taps rosca	AC316L	1,68 kg	910/kg	1528,8
Vàlvula de bola	AC316L	2,73 kg	910/kg	2484,3
Equips de mesura	-	-	800	800
Operació de fabricació	AC316L		840	169402,8
Transport	-	150 km	34/km	5100
<b>TOTAL</b>				<b>223290</b>

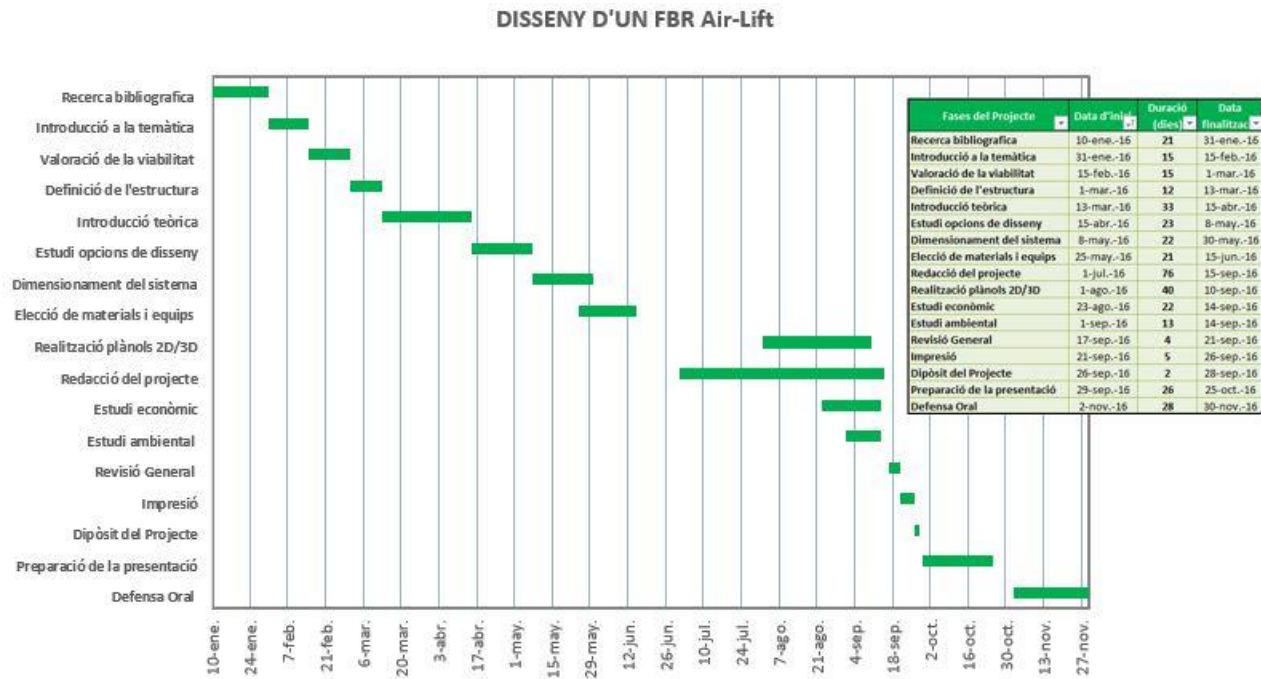
*Taula 2. Ecoindicadors 99 per als elements més significatius del FBR.*

Com es pot veure detalladament a la taula 2 valor numèric obtingut a partir de les taules amb ecoindicadors 99 és de 223290.

Per a poder valorar el resultat i col·locar el valor obtingut dintre d'un ordre de magnitud comprensible, es pren de referencia una cafetera, que suma 536 milipunts

## 12. Planificació del projecte

Per a la planificació de totes etapes del projecte, per marcar una pa tant una pauta de prioritats en l'ordre de treball com per fer un seguiment del seu compliment es realitza un diagrama de Gantt, el qual és presentat a continuació:





## Conclusions

Com a resultat d'aquest projecte s'ha complert amb l'objectiu de dissenyar un fotobioreactor de tipus air-lift que opera amb un volum de 100L, funciona en mode batch i està destinat especialment al cultiu de microalgues, en concret a l'espècie *Chlorella vulgaris*.

Aquest sistema ha estat definit com una estructura vertical, constituïda per dos tubs situats concentríacament un de l'altre. Entre ells circula generant un loop el fluid de cultiu, el qual ascendeix per l'interior del riser impulsat per una corrent gasosa introduïda a través d'un difusor de disc ceràmic, situat en el punt més baix d'aquest. Per la constitució pròpia d'aquest reactor, no es precisa de cap tipus de sistema d'agitació mecànica.

El fotobioreactor reposa sobre una estructura de suport, que l'eleva fins a una alçada de 0,5m respecte el nivell del terra per tal de permetre que l'operari pugui treballar de forma ergonòmica. Aquest suport dissenyat en perfilaria d'alumini anoditzat presenta un dimensionament general de 0,5x0,5x2m.

El Sistema dissenyat presenta un tub cilíndric interior de vidre borosilicat de  $L=1,1\text{m}$   $D=0,18$  i una espessor de paret de 5mm. En el cas del tub exterior, del mateix material que l'interior, presenta uns paràmetres de disseny de  $L=1,2\text{m}$ ,  $D=0,3\text{m}$  i un espessor de paret de 8mm. En la part tant superior com inferior d'aquest element existeixen uns ressals necessaris per al tancament del sistema. Acoblada damunt del cilindre exterior trobem el desgasificador o campana també realitzat en borosilicat..

En acer Inoxidable 316L s'han realitzat els tancaments superior i inferior del reactor. Per al cas de l'inferior aquest conté una vàlvula de bola que actua com a sistema de buidat i un suport en forma de mitja corona elevat respecte placa base on s'acoblarà el tub interior en la seva part baixa. El motiu d'aquesta estructura es permetre la introducció del sistema d'airejat. Tot aquest conjunt roman unit al tub exterior per mitja d'un sistema de mordaces semi circulars que pressionen el ressalt del tub exterior contra la base del reactor.

La tapa superior compte amb 6 ports destinats tant a la introducció del flux de gas com a l'entrada i posicionament de les diferents sondes de control requerides, principalment per a la mesura del pH i la temperatura. La posició d'aquests elements ha de permetre accedir a una zona ubicada a l'espai comprés entre el tub interior i exterior, a la meitat de l'alçada total. Aquesta tapa superior no serà suportada per cap tipus de sistema d'abraçadores, sinó que reposa sobre el perfil del desgasificador.

Per altra banda, aquesta tapa superior presenta com a innovació un sistema de subjecció del tub interior o riser que permet que la ubicació d'aquest en si del sistema per a que no obstaculitzi la correcta circulació de fluid al llarg del reactor.

Pel que fa al sistema d'airejat aquest està constituït per un difusor de disc ceràmic de diàmetre 10cm, ubicat a l'entrada inferior del riser. Aquest sistema de bombolleig està ideat per aportar un flux constant de gas de 1,5 l/s.

La il·luminació del reactor es planteja per mitja d'unes 7 tires de LED's fixades contra la paret exterior del downcomer al llarg de tota la seva alçada, per mitja d'un adhesiu de doble cara, aportant una intensitat lumínica total de 40000l lux treballant amb un cicle circadiari de 12:12h. Aquesta dada ha estat basada per l'estudi realitzat per Claudia Sacasa l'any 2013.

S'ha calculat que operant l'equip en un medi sense aportació extra de nutrients excepte l'entra de CO<sub>2</sub> al 3% per bombolleig, aquest sistema pot produir al voltant de 30g de residu sec de biomassa de microalga per lot de treball. Segons les dades experimentals aportades per diversos investigadors aquesta productivitat pot ser incrementada substancialment per mitjà d'una aportació d'una font de carboni extra.

En referència a l'estudi econòmic, després comptabilitzar el cost de tots els elements que conformen el sistema s'ha obtingut un cost total de 7651,39€ (IVA no inclòs).



## Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair al Jordi Bou, tutor d'aquest projecte, la dedicació, la il·lusió i l'empenta que m'ha donat per a la realització d'aquest treball, especialment en la seva part final, sense la seva ajuda aquest resultat no hauria estat possible.

En segon lloc, tampoc oblidar-me de la meva família, en especial dels meus pares a qui m'agradaria agrair tots els esforços que han fet perquè jo pugues estudiar a Barcelona tots aquests anys. També vull donar les gràcies als meus tiets, per haver-me obert les portes de casa seva durant els primers anys de la meva etapa universitària. De la mateixa manera, guardar un record per tots aquells que ja no hi són, sense ells i les estones viscudes al seu costat, mai hauria pogut arribat a ser qui sóc avui.

Finalment gràcies a tots aquells amb qui he compartit alguna que altra estona aquests anys a l'ETSEIB, han fet d'aquesta etapa una de les millors de la meva vida.



## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. *Popular topics. What is Green Chemistry*. Washington, 2014  
[<https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry.html>], juny 2016
- [2] INGENIERÍAQUIMICA.ORG. Artículos. *Los 9 peores desastres de la industria química*. Argentina, 2015.  
[<http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/peores-desastres-industria-quimica>], Juliol 2016
- [3] Bou, J. *Apunts de l'assignatura de Reactors Avançats*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Departament d'Enginyeria Química 2011
- [4] OFICINA CATALANA DEL CANVI CLIMÀTIC. *Nota Informativa Sobre la metodologia d'estimació del mix elèctric per part de l'Oficina Catalana Del Canvi Climàtic*. 2016.  
[[http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex\\_emissions/factors\\_emissio\\_associats\\_energia/160219\\_Nota-metodologica-mix\\_cat.pdf](http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/reduex_emissions/factors_emissio_associats_energia/160219_Nota-metodologica-mix_cat.pdf)], setembre 2016
- [5] GUIA DE EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES DE PRODUCTO - Edición revisada 2006. . Bilbao. Editorial IHOBE
- [6] Sacasa Castellanos,C. *Batch and continnous studys of Chlorella vulgaris in photobioreactors. 2013. Electronic thesis and dissertation repository. Paper 113. University of western Ontario*.
- [7] Brown McFarlane. *Aceros inoxidable tipo 316 y 316L*.  
[<http://www.brownmac.com/products/stainless-steel-plate/316-and-316l-spanish.aspx>] juliol 2016
- [8] BARCELONA LED [<http://www.barcelonaed.com/49-tira-de-led-230v>] setembre 2016
- [9] SOFTWARE DE DISSENY 2D/3D [[www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)], juliol 2016
- [10] Scarcella.M et al. *Study on the optimal growing conditions of Chlorella vulgaris in bubble column photobioreactors*. 2<sup>nd</sup> international conference on industrial biotechnology. 2010. Vol.20.

- [11] Rubio Fernández.D et al. *Diseño de un fotobioreactor Airlift a escala banco*. Elementos 2014 Ed.4
- [12] MALGAS, “Aplicaciones de las microalgas estado de la técnica. [[www.ast-ingenieria.com/guia-malgas-1](http://www.ast-ingenieria.com/guia-malgas-1)] Juliol 2016
- [13] Fernandez Sevilla, J, *Ingenieria de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. [[www.ual.es](http://www.ual.es)], Agost 2016
- [14] Cloude Fontana, Roselei et al. *Comparison of stirred tank and airlift bioreactors in the production of polygalacturonases by Aspergillus oryzae*. Bioresource Technology 100 (2009) 4493
- [15] Zhong JJ. *Bioreactor engineering*, Comprehensive biotechnology, 2011 vol.2 chap.2.14.