



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Química

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA A UNA
MICROCERVESERIA. ESTUDI TÈCNIC-ECONÒMIC
DE L'EDAR**



Memòria

Autor: Itan van Engelen
Director: Francesc Estrany Coda
Convocatòria: Abril 2019

Resum

Aquest projecte tracta d'un estudi sobre l'aplicabilitat dels residus del procés d'elaboració de la cervesa artesana. Es dedica especial atenció al tractament de les aigües residuals del procés.

A partir dels principals ingredients i el procés d'elaboració de la cervesa, s'obtenen uns residus d'alt contingut orgànic amb una gran varietat d'aplicacions, aquests residus s'han de gestionar correctament, preferiblement valoritzant-los perquè puguin ser reutilitzats. L'aigua residual d'una cerveseria, està caracteritzada per contenir alts nivells de matèria orgànica (DQO i DBO) i de matèria en suspensió (MES o SS). En aquest projecte s'analitza el procés de tractament de l'aigua residual d'una microcerveseria, posant especial atenció a l'oxidació biològica dels contaminants i el funcionament d'un reactor discontinu seqüencial (SBR). S'ha realitzat el dimensionament i disseny d'una estació depuradora d'aigua residual (EDAR) per una producció d'aproximadament 2.400 litres de cervesa setmanals de mitjana, tenint en compte la intermitència del cabal a tractar. Finalment s'ha realitzat el corresponent pressupost.

Resumen

Este proyecto trata de un estudio sobre la aplicabilidad de los residuos del proceso de elaboración de la cerveza artesana. Se dedica especial atención al tratamiento de las aguas residuales del proceso.

A partir de los principales ingredientes y el proceso de elaboración de la cerveza, se obtienen unos residuos de alto contenido orgánico con una gran variedad de aplicaciones, estos residuos deben gestionarse correctamente, preferiblemente valorizándolos para que puedan ser reutilizados. El agua residual de una cervecería, está caracterizada por contener altos niveles de materia orgánica (DQO y DBO) y de materia en suspensión (MES o SS). En este estudio se analiza el proceso de tratamiento del agua residual de una microcervecería, poniendo especial atención a la oxidación biológica de los contaminantes y el funcionamiento de un reactor discontinuo secuencial (SBR). Se ha realizado el dimensionamiento y diseño de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) para una producción de aproximadamente 2.400 litros de cerveza semanales de media, teniendo en cuenta la intermitencia y variaciones del caudal a tratar. Finalmente se ha realizado el correspondiente presupuesto.

Abstract

This project deals with a study on the applicability of the residues of the craft brewing process. Special attention is given to the treatment of wastewater from the process.

From the main ingredients and the brewing process, solid waste of high organic content are obtained with wide variety of applications, these residues must be managed correctly, preferably valorising them so that they can be reused. High levels of organic matter (COD and BOD) and suspended solids (SS) characterize the residual water of a brewery. In this study, the wastewater treatment process of a microbrewery is analysed, paying special attention to the biological oxidation of contaminants and the operation of a sequential batch reactor (SBR). The sizing and design of a sewage treatment plant (WWTP) has been carried out for a production of 2.400 liters of beer per week on average, taking into account the intermittency and variations of the flow to be treated. Finally the corresponding budget been made.

Agraïments

En primer instància, vull agrair al meu tutor, Francesc, per permetrem realitzar aquest projecte i per la seva disponibilitat sempre que ho he necessitat.

Vull agrair a tots els socis i treballadors, i especialment al Marc, de la cerveseria La Calavera. No només per les dades que m'han deixat recol·lectar per la realització del treball sinó també per l'amabilitat i consells que m'han donat els moments que he pogut estar a la fàbrica.

També vull agrair a l'Àngel, enginyer especialitzat en el tractament d'aigües. Els seus consells i recomanacions m'han set molt útils per a la realització del projecte.

Finalment, gràcies a tots els familiars i amics que m'han donat suport i consells durant aquest temps.

Glossari

Acrònims:

DQO = Demanda química d'oxigen.

DBO = Demanda bioquímica d'oxigen o demanda biològica d'oxigen.

DBO₅ = Demanda bioquímica d'oxigen transcorregut 5 dies.

MES o SS = Matèria en suspensió o sòlids en suspensió.

VSS = Sòlids volàtils en suspensió.

NVSS = Sòlids no volàtils en suspensió.

MLVSS = Sòlids volàtils en suspensió en el licor mescla.

MLNVSS = Sòlids no volàtils en suspensió en el licor mescla.

SVI = Índex volumètric de fangs (concentració) (mg SS/L)

SRT = Solids retention time (temps de retenció dels fangs en el reactor) (d)

FS = Factor de seguretat

CRC = Catàleg de Residus de Catalunya

Nomenclatura:

r_x = Taxa de creixement bacterià (mg/L·d o kg/m³·d)

r'_x = Taxa de creixement bacterià corregida (mg/L·d o kg/m³·d)

r_s = Taxa d'utilització de substrat (mg DBO₅/L·d o kg/m³·d)

X = Concentració de microorganismes (mg /L o kg /m³)

S = Concentració de substrat que limita el creixement (mg DBO₅/L o kg DBO₅/m³)

μ = Taxa de creixement específic de microorganismes (d⁻¹)

μ_m = Màxima taxa de creixement específic (d⁻¹)

q = Taxa específica d'eliminació de substrat (d⁻¹)

Y = Coeficient de producció màxima, definit com la relació entre la massa de cèl·lules formades i la massa de substrat consumit (kg MLVSS/kg DBO₅)

Y_{obs} = Coeficient de producció observada (kg MLVSS/kg DBO₅)

K_S = Constant de velocitat meitat, concentració de substrat a la meitat de la màxima taxa de creixement (mg/L)

k_m = Taxa màxima d'utilització de substrat per unitat de microorganismes (kg DBO₅/kg MLVSS·d)

r_d = Taxa de descomposició endògena (mg/L·d o kg/m³·d)

k_d = Coeficient de descomposició endògena (d⁻¹)

F/M = Relació aliment/microorganismes (kg DBO₅/kg MLVSS o kg DBO₅/kg MLSS)

θ_x = Temps de retenció de sòlids o temps de retenció cel·lular (d)

θ = Temps de retenció hidràulic (d)

θ_c = Edat del fang

$V = V_T$ = Volum del reactor (L o m³)

V_0 = Volum del reactor descarregat (L o m³)

Q = Cabal d'aigua que entra al reactor o affluent (L/d o m³/d)

Q_E = Cabal d'aigua tractada que surt del reactor o efluent (L/d o m³/d)

Q_P = Cabal de fang purgat (L/d o m³/d)

X_0 = Concentració de microorganismes que entren al reactor (mg/L o kg/m³)

X_E = Concentració de microorganismes en l'efluent (mg/L o kg/m³)

X_P = Concentració de microorganismes en la purga (mg/L o kg/m³)

S_0 = Concentració de substrat que entra al reactor (mg DBO₅/L o kg DBO₅/m³)

P_x = Quantitat de microorganismes produïts i purgats del sistema (kg /d)

M_x = Quantitat de biomassa que poden ser retinguda en el reactor (kg)

E = Eficiència del reactor (%)

R_{O_2} = Requeriment teòric d'oxigen diari (kg O₂/d)

R_{aire} = Requeriment teòric d'aire diari (kg aire/d)

M_{aire} = Pes molecular aire (g/mol)

M_{O_2} = Pes molecular oxigen (g/mol)

Q_{aire} = cabal d'aire diari (m³/d)

ρ_{aire} = densitat de l'aire

X_R = Concentració de microorganismes del reactor descarregat (mg/L o kg/m³)

T_C = Temps del cicle (h)

T_F = Temps d'emplenament (h)

T_R = Temps de reacció (h)

T_S = Temps de sedimentació (h)

T_W = Temps de descàrrega (h)

T_I = Temps d'inactivitat (h)

V_F = Volum d'emplenament del reactor (L/cicle o m³/cicle)

N_C = Nombre de cicles per dia

θ_x^E = Edat efectiva del fangs (d)

n = Nombre de reactors

V_{Fn} = Volum d'emplenament de cada reactor (L o m³)

V_R = Volum de cada reactor (m³)

H_0 = Altura mínima dels fangs en el reactor (m)

Índex

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRAÏMENTS	IV
GLOSSARI	V
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Objectius del projecte	2
2. MATÈRIES PRIMERES	3
3. PROCÉS D'ELABORACIÓ DE CERVESA ARTESANA	6
4. RESIDUS SÒLIDS DEL PROCÉS D'ELABORACIÓ	11
4.1. Bagàs.....	11
4.2. <i>Hot trub</i> i llúpol	14
4.3. <i>Cold trub</i> i restes de llevat	15
4.4. Gestió dels residus	16
5. AIGÜES RESIDUALS	26
5.1. Tractament d'aigües residuals industrials	27
5.2. Aigua residual de la indústria cervesera.....	29
5.3. Procés de tractament.....	31
5.3.1. Pretractament	31
5.3.2. Tractament biològic	32
5.4. Elecció del reactor biològic	33
6. REACTOR SBR	35
6.1. Equipaments i instrumentació d'un SBR	36
6.2. Fonaments de l'oxidació biològica.....	38
6.2.1. Procés d'oxidació biològica.....	39
6.3. Microbiologia del sistema de fangs activats.....	41
6.3.1. Cinètica de creixement.....	42
6.3.2. Influència de la temperatura.....	45
6.3.3. Influència del pH.....	46
6.3.4. Requeriments d'oxigen i nutrients.....	46
6.4. Paràmetres de control del procés.....	46

6.4.1.	Relació aliment-microorganismes.....	47
6.4.2.	Temps de retenció de sòlids	47
6.5.	Problemes que afecten al procés de fangs activats	48
6.6.	Objectius de depuració.....	49
6.7.	Fangs de depuradora	50
7.	DISSENY D'UN SBR PER L'ELIMINACIÓ DE DBO	51
7.1.	Variables i paràmetres de disseny.....	51
7.1.1.	Característiques de l'afluent i l'efluent	51
7.1.2.	Cinètica del reactor. Balanç de masses	51
7.1.3.	Determinació dels coeficients cinètics	53
7.1.4.	Taxa específica d'eliminació de substrat, temps de retenció hidràulic, temps mig de retenció cel·lular i edat del fang	53
7.1.5.	Biomassa del reactor.....	56
7.1.6.	Criteris de càrrega.....	56
7.1.7.	Producció de fangs	57
7.1.8.	Requeriments d'oxigen.....	58
7.1.9.	Propietats de sedimentació	59
7.2.	Mètode de disseny de Orhon	59
7.2.1.	Procediment de disseny de Orhon.....	61
8.	DISSENY DE L'EDAR	63
8.1.	Descripció de la planta.....	65
8.2.	Arquetes	66
8.3.	Tamís.....	66
8.4.	Dipòsits	68
8.5.	Sistema d'aeració	69
8.6.	Sistema de mescla.....	70
8.7.	Bombes.....	71
8.8.	Canonades i vàlvules.....	74
8.8.1.	Canonades d'aigua	74
8.8.2.	Canonades d'aire	75
8.9.	Control i automatització.....	77
8.9.1.	Control de pH	78
8.9.2.	Control d'oxigen dissolt	79
8.9.3.	Control d'oxigen dissolt	80
8.9.4.	Temporitzadors.....	80
9.	POSADA EN MARXA I RECOMANACIONS D'OPERACIÓ	82

10. LEGISLACIÓ	83
11. IMPACTE AMBIENTAL	84
ANÀLISI ECONÒMIC	85
11.1. Elaboració del projecte	85
11.2. Materials i aparells.....	85
11.3. Cost d'obra.....	88
11.4. Cost d'instal·lació.....	88
11.5. Cost total del projecte	88
CONCLUSIONS	89
BIBLIOGRAFIA	90

Índex de figures

- Figura 1. Diferents tipus de malt segons el seu torrat. A l'esquerra un malt torrat, al mig un malt caramel i a la dreta un malt base. Font: www.brewhive.com _____ 3
- Figura 2. . Flors de llúpul. Font: <http://www.greatfermentations.com> _____ 4
- Figura 3. . LLevat sec (*Saccharomyces cerevisiae*) per la producció de cervesa. Font: www.feedsforless.com _____ 5
- Figura 4. Reproducció del llevat per gemmació vistes a través d'un microscopi. Font: <http://phylomedb.org> _____ 5
- Figura 5. Filtre de carbó actiu per la decloració i descalcificador de l'aigua per l'elaboració de cervesa. Font pròpia. _____ 6
- Figura 6. Tanc macerador amb una comporta a la part inferior per extreure el bagàs. Font pròpia. _____ 6
- Figura 7. Interior del tanc macerador amb ruixador per fer el sparging. Font pròpia. _____ 7
- Figura 8. Olla de cocció amb tapa a la part superior per afegir el llúpul, i una comporta a la part inferior per treure el hot trub i restes de llúpul. La bomba s'utilitza per transportar el most i realitzar el remolí per acumular els sòlids al centre del tanc. Font pròpia. _____ 7
- Figura 9. Bescanviador de calor a contracorrent per refredar el most. Font pròpia _____ 8
- Figura 10. Injecció l'oxigen pur en el most refredat. Font pròpia _____ 8
- Figura 11. Fermentadors i tancs de maduració amb la opció de purgar el llevat sedimentat a dos nivells diferents. Font pròpia. _____ 9
- Figura 12. Embotelladora de cervesa. Font pròpia. _____ 10
- Figura 13. Extracció del bagàs del tanc de maceració posterior al sparging. Font pròpia _____ 12
- Figura 14. Emmagatzematge del bagàs a l'exterior de la fàbrica. Font pròpia _____ 12

Figura 15. Restes de llúpol i hot trub al fons de l'olla de cocció després del Whirlpool. Font: http://www.lehuien.industrialmanufacturer.net	14
Figura 16. Restes de llevat extretes del fons del fermentador. Font: http://www.winimi.co.uk	15
Figura 17. Tanc d'emmagatzematge de les restes de llúpol i llevat a l'exterior de la fàbrica. Font: pròpia	16
Figura 18. Vies de gestió de residus de la producció de begudes alcohòliques i no alcohòliques (excepte café, te i cacau). Font: sdr.arc.cat	21
Figura 19. Etapes d'un SBR. Font: http://www.ethicsinfinity.com	35
Figura 20. Assimilació i dissimilació de carboni durant el tractament aerobi d'aigües residuals. Font: (Vriens et al. 1990)	39
Figura 21. Corba massa-temps durant operacions discontinues. Representant l'aliment (o residu), els microorganismes i l'oxigen consumit. Font: (Vriens et al. 1990)	40
Figura 22. Successió de poblacions microbianes amb el temps i augmentant l'eficiència de la depuració aeròbica d'aigües residuals. Font: (Vriens et al. 1990)	41
Figura 23. Representació dels efectes del substrat limitant sobre la velocitat específica de creixement.	44
Figura 24. Representació esquemàtica d'un reactor RCTA	54
Figura 25. Esquema d'un SBR	60
Figura 26. Producció diària d'aigua residual i aigua residual mitja produïda per dia.	64
Figura 27. Representació esquemàtica de l'EDAR.	66
Figura 28. Tamís estàtic. Font: www.toroequipment.com	67
Figura 29. Representació esquemàtica del funcionament del tamís estàtic. Font: www.toroequipment.com	67

Figura 30. Estructura per elevar el tamís. Font: www.toroequipment.com	67
Figura 31. Dipòsit per ser enterrat de fibra de vidre. Font: www.tadipol.com	68
Figura 32. Dipòsit IBC. Font: www.bauhaus.es	69
Figura 33. Distribució dels difusors al fons del dipòsit	69
Figura 34. Difusor d'aire de bombolla fina. Font: www.sulzer.com	69
Figura 35. Exemple compressor d'aire . Font: www.becker-international.com	70
Figura 36. Agitador de turbina radial de 4 pales. Font: www.agitadoresfluidmix.com	71
Figura 37. Bomba per a aigües residuals amb sòlids fins a 50mm. Font: www.ebara.es	72
Figura 38. Bomba submergible per aigües carregades. Font: www.bombashasa.com	72
Figura 39. Plataforma per ajustar l'altura de la bomba.	73
Figura 40. Bomba per descàrrega de l'efluent. Font: www.bombasperfecta.es	73
Figura 41. Bomba per aigües residuals carregades i amb sòlids filamentosos. Font: www.bambashasa.com	74
Figura 42. Unió PVC llis amb rosca per unir als diferents equips. Font: www.aliaxis-ui.es	74
Figura 43. Suport per canonades de PVC. Font: www.aliaxis-ui.es	75
Figura 44. Producte neteja PVC-U. Font: www.generaladhesivos.com	75
Figura 45. Cola PVC-U. Font: www.generaladhesivos.com	75
Figura 46. Conjunta en forma de T. Font: www.girpi.com	76
Figura 47. Conjunta reductora en forma de T. Font: www.girpi.com	76

Figura 48. Vàlvula manual de doble unió. Font: www.girpi.com	76
Figura 49. Suports per subjectar les canonades d'aire. Font: www.girpi.com	77
Figura 50. CLEANER +. Font: www.girpi.com	77
Figura 51. GAFIX. Font: www.girpi.com	77
Figura 52. Armari elèctric. Font: www.automation24.es	78
Figura 53. Sensor de pH 2. Font: www.dosatronic.de/es	78
Figura 54. Porta elèctrodes d'immersió. Font: www.dosatronic.de/es	78
Figura 55. Controlador de dos canals DCW230. Font: www.dosatronic.de/es	79
Figura 56. Sistema de dosificació. Font: www.dosatronic.de/es	79
Figura 57. Elèctrode d'oxigen dissolt de membrana. Font: www.crisoninstruments.es	80
Figura 58. Porta elèctrodes d'immersió. Font: www.dosatronic.de/es	80
Figura 59. Controlador monocanal. Font: www.dosatronic.de/es	80
Figura 60. Temporitzador. Font: www.omron.es	81
Figura 61. Adaptador. Font: www.digikey.es	81
Figura 62. Endoll pel relés. Font: www.digikey.es	81

1. INTRODUCCIÓ

Durant els últims anys, a Europa s'està produint un canvi en la indústria cervesera. És un fenomen que ja va sorgir a Estats Units els anys 80, i s'està expandint cap a Europa sobretot aquesta última dècada, la cervesa artesana. Aquesta cervesa es caracteritza per produir-se a molt més petita escala, utilitzant receptes més atrevides gràcies a les que s'obtenen una gran varietat d'estils diferents, amb gustos, aromes i colors variats que atrau l'atenció dels consumidors.

En els últims anys a Espanya, i més en concret en la comunitat de Catalunya, s'observa un gran augment en el nombre de cerveseries noves, les quals són casi totes cerveseries artesanes, també anomenades microcerveseries. Només a Catalunya, s'ha passat de 39 cerveseries l'any 2012 a 105 cerveseries l'any 2016.

S'ha estudiat profundament la indústria cervesera durant l'últim segle, però aquests estudis han estat majoritàriament centrats en les grans cerveseries industrials. El repte d'aquest projecte, és adaptar aquests coneixements per a les indústries més petites que estan sorgint recentment. Igual que les cerveseres industrials, les microcerveseries han de complir amb les normatives per protegir el medi ambient però amb un pressupost molt més reduït.

En el món on vivim, està creixent la idea de economia circular, remarcant la importància dels residus que es produeixen, intentant reduir-los el que sigui possible, reutilitzar-los i reciclar-los. La indústria cervesera és un exemple on es pot aplicar perfectament aquest model, ja que en el procés de fabricació de cervesa els residus produïts no presenten contaminants molt perillosos i poden ser reutilitzats o reciclats d'alguna forma.

L'aigua residual d'una cerveseria, pot semblar inofensiva en primera instància, però degut a la gran concentració de matèria orgànica que conté pot ser un perill pels éssers vius que viuen en les aigües més avall, consumint l'oxigen que necessitarien ells per viure. És un repte per les microcerveseries complir amb les normatives establertes per protegir el medi ambient, ja que el tractament de les aigües residuals pot suposar una inversió econòmica important. S'ha de buscar, per tant, una solució el més viable possible per aquestes petites indústries cerveseres que estan sorgint.

1.1. Objectius del projecte

Els objectius principals del projecte són:

- Identificar possibles aplicacions per els residus del procés d'elaboració de cervesa artesana.
- Dissenyar una estació de depuració d'aigua residual (EDAR) per una microcerveseria.
- Realitzar el pressupost de la instal·lació de l'EDAR.

Per complir els objectius principals, s'han establert uns objectius secundaris:

- Identificar les matèries primeres utilitzades i el procés d'elaboració de la cervesa artesana.
- Descriure els diferents residus produïts en el procés.
- Identificar les característiques de l'aigua residual d'una cerveseria.
- Analitzar el procés de tractament d'aigua residual per una cerveseria.
- Analitzar el procés d'oxidació biològica de matèria orgànica present en l'aigua.
- Analitzar el funcionament un reactor discontinu seqüencial per la posterior aplicació.

2. MATÈRIES PRIMERES

Per la fabricació de cervesa es necessiten 4 ingredients principals: Aigua, malt, llúpul i llevat. Apart dels quatre elements principals es poden afegir adjunts per afegir altres característiques i gustos. També es poden afegir diferents sals o àcids per regular la composició química de l'aigua.

Malt

El malt són llavors de gra que es deixen germinar parcialment i es para el procés aplicant calor. La majoria de cerveses s'elabora a partir de l'ordi (*Hordeum vulgare*) però depenent de l'estil es poden afegir altres grans com el blat, civada, sègol, sorgo i mill entre altres (Huxley 2011).

El malt serveix com a font de midó i també proporciona els enzims necessaris per descompondre el midó en sucres fàcilment fermentables que són utilitzats per el llevat per produir alcohol i CO₂. És el principal responsable del color de la cervesa i pot aportar un sabor dolç provenint de la caramel·lització de sucres. Les proteïnes que contenen els grans donen estructura a l'espuma i els minerals que conté són nutrients essencials que necessita el llevat per desenvolupar-se (Mallett 2014).

Durant el procés de maltatge, el gra es deixa germinar i es para el procés aportant calor. Depenen de la temperatura i el temps d'aquest procés s'obtenen malts poc o més caramel·litzats, aportant diferents gustos i colors a la cervesa.



Figura 1. Diferents tipus de malt segons el seu torrat. A l'esquerra un malt torrat, al mig un malt caramel i a la dreta un malt base. Font: www.brewhive.com

Aigua

L'aigua és l'ingredient majoritari en la cervesa, suposa més d'un 90% de la composició final. Els minerals que estan dissolts en ella tenen molta importància en les reaccions que es duen a terme durant diferents etapes del procés d'elaboració. La composició química de l'aigua té influència en el caràcter de la cervesa final, per fabricar diferents estils es necessiten diferents concentracions de minerals i ions que estan dissolts en ella. Perquè una aigua sigui apte per la fabricació de cervesa ha de ser potable, apart

de contenir un mínim de sals dissoltes. Per això és molt comú un pretractament de l'aigua abans que s'utilitzi per la fabricació de cervesa (Palmer and Kaminski 2013).

Apart de l'aigua que acaba dins el producte final, durant tot el procés es requereixen gran quantitats d'aigua per netejar l'equipament, refredar el most calent després de l'ebullició, etc. També es perd aigua per evaporació i en queda retinguda en els residus que s'obtenen. S'utilitzen entre 5 i 10 vegades més volum d'aigua que de cervesa produïda, aquest valor pot variar molt depenent de la instal·lació que s'utilitzi i les tècniques que s'utilitzin per reduir-ne el consum. Aquesta aigua, que pot contenir productes de neteja i grans quantitats de residus, normalment necessita ser tractada perquè supera els límits permesos de diferents contaminants. El tractament de les aigües residuals es tracta més endavant en aquest treball.

Llúpol

El llúpol és una planta enfiladissa i perenne de la família de les *cannabaceae*. Per la fabricació de la cervesa s'utilitzen les flors de les plantes femenines, que es presenten en forma de cons. Aquests cons contenen gran varietat de resines i olis aromàtics que donen diferents propietats a la cervesa com són amargor, aroma, acceleració de la clarificació de la cervesa i precipitació de proteïnes durant l'ebullició apart de posseir propietats antibacterianes que ajuden a conservar el producte final (Briggs et al. 2004; Hieronymus 2012; Huxley 2011). Els llúpols es classifiquen en dos grans grups: els d'amargor i els aromàtics. Els primers són els responsables principalment de l'amargor característic de les cerveses i els segons són els responsables d'una gran varietat d'aromes i sabors que tenen els diferents estils de cervesa.



Figura 2. . Flors de llúpol. Font: <http://www.greatfermentations.com>

Llevat

El llevat es un organisme eucariòtic unicel·lular, existeixen moltes espècies que es classifiquen segons la seva forma cel·lular, la reproducció, la seva fisiologia i el seu hàbitat. La classe que interessa per produir cervesa és la família de les *Saccharomyces*, més concret les *Saccharomyces cerevisiae*, per la seva habilitat de metabolitzar sucres i produir alcohol etílic i diòxid de carboni. Les cèl·lules es reproduïxen per gemmació, es divideixen en dos, i la part més petita, surt a l'exterior i fa el mateix procés. El cicle continua mentre hi hagi oxigen (procés aeròbic), un cop aquest és consumit, comencen a metabolitzar els sucres per produir alcohol etílic i CO₂ apart d'altres subproductes entre els quals es

troben èsters, alcohols superiors, cetones, fenols i varis àcids orgànics (procés anaeròbic). Gràcies al seu metabolisme el llevat té una gran influència sobre el gust i el caràcter de la cervesa (White and Zainasheff 2010; Huxley 2011).

Com s'ha dit, el llevat és el responsable de l'alcohol en la cervesa apart d'aportar diferents sabors. Els llevats es classifiquen en dos grans grups, els de alta fermentació i els de baixa fermentació. Els primers s'anomenen així perquè viuen a la part superior del fermentador i viuen a temperatures altes (al voltant de 20 °C) i els segons viuen en el fons del fermentador a temperatures inferiors (al voltant de 8 °C). Les cerveses industrials solen ser de fermentació baixes, en canvi les cerveses artesanes solen ser de fermentació alta.



*Figura 3. . Llevat sec (*Saccharomyces cerevisiae*) per la producció de cervesa. Font: www.feedsforless.com*

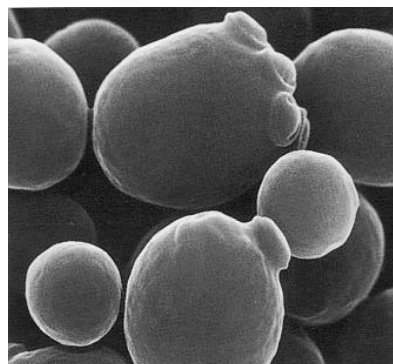


Figura 4. Reproducció del llevat per gemmació vistes a través d'un microscopi. Font: <http://phylomedb.org>

Adjunts

Apart del ingredients principals, es poden afegir una infinitat d'adjunts per afegir diferents gustos i característiques a la cervesa. Aquests adjunts poden ser fruites, herbes o espècies entre altres (Huxley 2011). Aquests adjunts es poden afegir al final de l'ebullició del most o es poden afegir en el fermentador.

Es pot utilitzar tot tipus de fruita i cadascuna contribuirà a la cervesa amb els seus aromes i sabors específics. Les fruites més comunes són gerds, madeixes, cireres, peles de llimona i taronja entre altres.

Hi ha una gran varietat d'herbes i espècies que es poden afegir a la cervesa. Antigament, quan encara no s'utilitzava el llúpul s'utilitzaven gran varietat d'herbes i espècies per complementar la cervesa. Entre moltes herbes i espècies que s'utilitzen hi ha: donzell, alfàbrega, artemisa, anís estrellat, canella, cardamom, coriandre, comí, gingebre, nou moscada, arrel de regalèssia, romaní, farigola, vainilla, etc.

Fins i tot es poden afegir adjunts com la xocolata, cafè, diferents licors, verdures i bolets.

3. PROCÉS D'ELABORACIÓ DE CERVESA ARTESANA

No existeix una sola forma de produir cervesa, cada fàbrica utilitza les eines i equipament que més s'ajusta a les necessitats o gustos del mestre cerveser. Hi ha diferents formes per dur a terme les diferents etapes, molt sovint depenent de la capacitat de producció.

Tractament previ de l'aigua

Com que cada estil de cervesa requereix una composició química de l'aigua diferent és molt comú trobar un sistema de tractament de l'aigua que arriba a la fàbrica. Aquest tractament pot ser molt divers depenent dels paràmetres que es vulguin ajustar. La majoria de cerveseres utilitzen aigua de la xarxa, així que un tractament que es du a terme a quasi totes les fàbriques és la declaració de l'aigua, també és molt comú regular la concentració de calç per regular la alcalinitat i duresa de l'aigua. Però es poden trobar casos més complexos en la qual es necessita un tractament més complex com la osmosis inversa.



Figura 5. Filtre de carbó actiu per la decloració i descalcificador de l'aigua per l'elaboració de cervesa. Font pròpia.

Molta del malt

El malt s'ha de molturar perquè quan sigui afegit amb l'aigua durant la maceració l'aigua pugui accedir al midó del seu interior. El malt no s'ha de triturar, sinó que el que interessa és que es closques quedin més o menys intactes i no es produeixi excessiva farina. Les closques són necessàries perquè actuïn com a llit filtrant durant l'etapa de rentat, on es separa el most de les restes de gra (Huxley 2011).

Maceració

És l'etapa on es transforma el midó en un most de sucres fermentables, i de no fermentables. Per aconseguir-ho són necessaris enzims que es troben dins del malt. Els enzims són unes proteïnes que provoquen i fomenten reaccions químiques sense canviar la seva pròpia estructura. Si es donen les condicions adequades, és a dir, la correcta relació aigua/malt, el contingut de nutrients en l'aigua, la temperatura (entre 62 i 68°C), el pH (entre 5,1 i 5,5), els enzims trenquen les cadenes de midó per formar sucres de cadenes més senzilles (Huxley 2011).



Figura 6. Tanc macerador amb una comporta a la part inferior per extreure el bagàs. Font pròpia.

Rentat del most

El rentat es fa per fer una extracció completa dels sucres i nutrients que hi ha dins el gra i diluir el most fins a arribar a la densitat desitjada. El mètode més utilitzat és el *sparging* (ruixat) que consisteix en escampar aigua calenta per sobre del gra i que aquests actui de llit filtrant. Un cop finalitzada l'etapa del rentat, el most queda separat del gra, aquest residu és anomenat bagàs i és el primer residu sòlid del procés d'elaboració de cervesa amb un alt valor afegit que s'explica més endavant en el treball (Briggs et al. 2004).



Figura 7. Interior del tanc macerador amb ruixador per fer el sparging. Font pròpia.

Cocció del most

El most es porta a ebullició amb presència de llúpul durant per lo menys una hora per: parar l'activitat enzimàtica, esterilitzar el most, eliminar compostos volàtils indesitjables, coagular proteïnes i polifenols indesitjables. També per extreure, isomeritzar i dissoldre les resines toves del per provocar l'amargor i altres beneficis del llúpul, evaporar aigua per reduir el volum de most per aconseguir la densitat desitjada, promoure la formació de melanoïdines i pirazines que caramel·litzen alguns sucres presents que afegeixen aromes i intensifiquen el color del most i per ajustar el pH a un nivell favorable per la fermentació. (Briggs et al. 2004; Huxley 2011).



Figura 8. Olla de cocció amb tapa a la part superior per afegir el llúpul, i una comporta a la part inferior per treure el hot trub i restes de llúpul. La bomba s'utilitza per transportar el most i realitzar el remolí per acumular els sòlids al centre del tanc. Font pròpia.

Separació sòlids, refredament i aeració

Al final de la cocció del most queden restos sòlids formats principalment per la coagulació de proteïnes provenint majoritàriament del llúpul, el procés de coagulació, com que es du a terme a altes temperatures s'anomena *hot break*, on es forma una pasta que és coneguda com *hot trub* entre els cervesers i és comentada amb més profunditat més endavant en el treball. El *hot trub* normalment s'elimina del most utilitzant un "Whirlpool" que consisteix en crear un remolí per acumular els sòlids en el centre del fons del tanc, obtenint el segon residu sòlid del procés que a més a més de ser format pel *hot trub* conté restos de llúpul sobretot si s'han utilitzat en forma de cons sencers. Seguidament es passa al refredament del most que s'ha de dur a terme el més ràpid possible per diferents causes: primerament la temperatura s'ha de disminuir perquè pugui créixer el llevat, a més a més si es deixa descansar el most entre 30 i 50°C hi ha molta possibilitat d'invasió d'organismes indesitjables com són els bacteris. També hi ha risc d'oxidació del most, cosa que no interessa fins que la temperatura esta per sota els 24°C. Si el refredament és lent, es produeixen compostos de sofre no desitjats. Un cop la temperatura està per sota de 24°C ja no existeix risc d'oxidació del most i aquest és airejat per proveir d'oxigen el llevat, el qual necessita per desenvolupar-se en les fases inicials de la fermentació. Refredar ràpidament ajuda a la precipitació de proteïnes, polifenols i alguns lípids associats que produeixen problemes de claredat i estabilitat en la cervesa. Aquests precipitats, de composició molt semblant al *hot trub*, sedimenten en el fons del fermentador durant l'etapa de fermentació, com que el procés de precipitació es fa en fred, s'anomena *cold break*. (Briggs et al. 2004).



Figura 9. Bescanviador de calor a contracorrent per refredar el most.
Font pròpia



Figura 10. Injecció l'oxigen pur en el most refredat. Font pròpia

Fermentació

La fermentació comença amb la inoculació (sembra) del llevat en el most llupolat, refredat i oxigenat. Es controla la temperatura del fermentador depenent del tipo de llevat utilitzat per obtenir un màxim rendiment. El llevat metabolitza substàncies dissoltes en el most, sobretot el sucres, produint més llevat i moltes altres substàncies que caracteritzen la cervesa. Els productes majoritaris del metabolisme de carbohidrats són l'alcohol etílic (etanol) i diòxid de carboni. A partir de la densitat abans i després de la fermentació es pot estimar el contingut d'alcohol final en la cervesa. Al final de la fermentació les restes de llevat es sedimenten en el fons del fermentador conjuntament amb les proteïnes i polifenols que

sedimenten pel *cold break*. El residu obtingut del *cold break* s'anomena *cold trub* i es separa de la cervesa mitjançant purgues del fons del fermentador conjuntament amb el llevat mort.

Maduració

Un cop és casi finalitzada la fermentació principal, la cervesa verda, en el sentit d'immadura, es guarda perquè es produeixi la maduració d'aquesta, la qual es pot fer en el mateix fermentador o en un de diferent. En aquest procés es refinan els gustos de la cervesa. Aquesta etapa es sol produir a temperatures inferiors a la de la fermentació i és molt usat baixar la temperatura entre 0 i 4°C per fer precipitar substàncies indesitjables en el fermentador i d'aquesta manera obtenir una cervesa més clara. Aquestes sediments, també anomenats *cold trub* conjuntament amb el llevat mort s'extreuen del fons del fermentador (o madurador) a través de purgues igual que en el tanc de fermentació.



Figura 11. Fermentadors i tancs de maduració amb la opció de purgar el llevat sedimentat a dos nivells diferents. Font pròpia.

Filtració

És una etapa opcional, en les cerveses artesanes és un pas que molt sovint es salta. En l'etapa de filtració s'eliminen partícules fines que no hagin sedimentat en el fermentador i puguin aportar terbolesa a la cervesa, com són restos de llevat, proteïnes i polifenols. La filtració és la tècnica més utilitzada, amb combinació amb agents adsorbents. Els filtres més utilitzats són de cel·lulosa, terra de diatomees, perlita o carbó activat. (dos Santos et al. 2014).

Envasat

L'envasat és l'etapa on més es diferencia la cervesa artesana de la industrial. En la cervesa artesanal l'envasat es fa de principalment en dos formes: botelles i/o barrils. És també el moment d'afegir el diòxid de carboni a la cervesa, responsable de les bombolles. En aquest pas és important assegurar la qualitat del producte, ja que un cop envasat el producte ha d'estar preparat pel consum, el perill més gran és l'oxidació.

En el cas de la cervesa artesana, la tècnica utilitzada és dur a terme una segona fermentació en la botella o barril, afegint una petita quantitat de sucre i llevat i conservant la cervesa en una temperatura igual o una mica superior a la temperatura de fermentació primària. Durant la segona fermentació, es repeteix el procés de fermentació per l'elaboració de la cervesa, du a terme la transformació química següent:

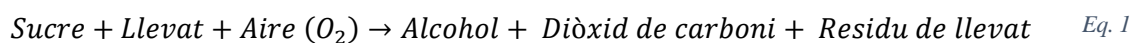




Figura 12. Embotelladora de cervesa. Font pròpia.

D'aquesta forma, s'elimina l'aire que pugui quedar en la botella que podria causar una oxidació posterior i s'afegeix el diòxid de carboni de forma natural. Els restos de llevat queden dipositats al fons de la botella i ajuda a estabilitzar la cervesa, sense necessitat de pasteuritzar-la. La cervesa continua evolucionant i madurant amb el temps dins de la botella. Es deixen les botelles fins a dos setmanes a la temperatura de fermentació. Amb aquest mètode, s'assegura una vida mínima d'un any, i depenent de l'estil, pot arribar fins a 10 anys sempre que es treballi en unes condicions de neteja adequada.

Les cerveses industrials, es sotmeten a una pasteurització per assegurar la seva estabilitat, fet que provoca la pèrdua d'algunes propietats nutritives i organolèptiques de la cervesa. A més, al no haver una segona fermentació, no es produeix la gasificació, pel que s'ha d'injectar diòxid de carboni de forma artificial.

Neteja dels equips

La neteja és molt important en el procés d'elaboració de cervesa. El llevat és molt sensible a contaminants i per això s'ha de treballar amb els equips el més net com sigui possible, tots els equips que estiguin en contacte amb llevat han d'estar esterilitzats. Per treure els sòlids que quedin en els equips, es necessiten productes químics. Es solen utilitzar tant productes àcids com bàsics i tots aquests productes, conjuntament amb els sòlids que arrossegueu van a parar a les aigües residuals del procés. Aquests productes solen tenir valors molt extrems de pH i per tant s'ha d'anar en compte a la hora de tractar amb ells i a la hora d'enviar-los a la xarxa de clavegueram.

4. RESIDUS SÒLIDS DEL PROCÉS D'ELABORACIÓ

En una fàbrica de cervesa es produeixen diferents tipus de residus, a primera vista hi ha els residus obtinguts a partir de les matèries primeres durant el procés d'elaboració, però també hi ha les aigües residuals del procés, els residus de l'empaquetatge de la cervesa i gasos que es puguin escapar durant el procés de cocció o fermentació. Tots els residus han de ser minimitzats, reciclats o reutilitzats sempre quan sigui possible. Aquest apartat només tracten els residus sòlids del procés d'elaboració de la cervesa: el bagàs, les restes de llúpul, restes de llevat i restos obtinguts de la filtració final de cervesa si es dona el cas. Més endavant es dedica un capítol pel tractament de les aigües residuals.

Durant el procés d'elaboració de cervesa s'obtenen diferents residus sòlids en diferents etapes del procés. Aquests residus contenen alts nivells de matèria orgànica pel que tenen una àmplia varietat de potencials aplicacions com a aliments, pinsos i a l'indústria biotecnològica. Depenent de la part del procés on són produïts es separen en tres grups: En l'etapa de rentat del most, el residu sòlid obtingut s'anomena bagàs; Després de la cocció, es separen el *hot trub* i restos de llúpul; finalment, després de la fermentació i maduració es separen els restos de llevat i *cold trub*. Existeixen diverses tècniques per separar aquests residus, igual que l'extracció de most o cervesa dels mateixos per reaprofitar-los. Aquestes tècniques només solen ser utilitzades per grans empreses ja que requereixen d'una inversió i espai elevat.

En la Taula 1 es mostren els components principals presents en els residus de l'elaboració de cervesa i a continuació s'expliquen les característiques de cadascun.

Paràmetre	Bagàs	<i>Hot trub</i> + restos llúpul	<i>Cold trub</i> + restos llevat
Fibres	✓	-	-
Carbohidrats	-	✓	✓
Proteïnes	✓	✓	✓
Aminoàcids	✓	-	✓
Cendres	✓	✓	✓
Vitamines	✓	-	✓
Components fenòlics	✓	✓	-
Àcids grassos	-	✓	✓

Taula 1. Components principals presents en els residus d'elaboració de cervesa. Font: (dos Santos et al. 2014)

4.1. Bagàs

És el subproducte obtingut després de l'etapa de maceració del gra un cop aquest és rentat i separat del most. Està format principalment per les closques del gra que queden retingudes, però també queden

petites fraccions de midó que no s'han extret en el procés de rentat. Durant la maceració, a prop del 80% de la massa del malt és solubilitzat, mentre queden retinguts en el bagàs les fraccions insolubles.



Figura 13. Extracció del bagàs del tanc de maceració posterior al sparging. Font pròpia



Figura 14. Emmagatzematge del bagàs a l'exterior de la fàbrica. Font pròpia

S'obté en gran quantitat i suposa a prop del 85% dels residus totals generats en l'elaboració de cervesa. A partir de 100 kg de gra processat s'obtenen entre 125 i 135 kg de bagàs amb una humitat del 80 al 85% (dos Santos et al. 2014).

El bagàs es pot vendre o dipositar de tres formes: mullat, sec o parcialment sec. Deixar el gra mullat, tal com s'obté un cop és separat del most, és la opció més econòmica i el bagàs es pot recol·lectar en un dipòsit a fora de la fàbrica, la desavantatge principal és que si es deixa durant uns dies, degut a la gran humitat, pot començar a podrir-se i produir males olors perdent el valor afegit que tenia. Una altre opció pot ser deshidratar el bagàs a través de centrifugació o filtració de premsa. Aquestes tècniques s'utilitzen per reduir el pes del bagàs i reduir-ne la humitat en cas de que sigui necessari per un ús posterior. El líquid resultant dels filtres i premses es poden concentrar per formar un subproducte, reciclar-lo dins de la cerveseria o fermentar-lo per produir alcohol. Per una empresa petita no resulta econòmicament viable ni solen disposar d'espai per realitzar un tractament al bagàs, ja que al produir-ne relativament petites quantitats, el bagàs no es sol vendre a tercers, sinó que és recollit gratuïtament per altres indústries que el poder reutilitzar. Tot i que es recomana realitzar el tractament, s'acostuma a emmagatzemar moll fins que és recollit (normalment el mateix dia o el dia posterior al de producció) per ser reutilitzat en una altre indústria. En cas d'empreses més grans pot ser econòmicament viable fer un tractament previ per vendre el subproducte a un tercer i reaprofitar el líquid extret.

Encara que la composició pot variar depenent del malt utilitzat, la mida de molta del gra i el procés de maceració el bagàs és un material molt fibrós amb un nivell significant de proteïnes i conté un valor nutricional d'una cinquena part del gra inicial. El bagàs conté entre un 15 i 26% de proteïnes i un 70% de fibres, que es poden dividir en cel·lulosa (15 a 25%), hemicel·luloses (28 a 35%) i lignina (28%) . També pot contenir lípids (entre 3,9 i 10%), cendres (2,5 i 4,5%), vitamines, aminoàcids i components fenòlics. També està format per components minerals com calci, fòsfor i seleni, es troben vitamines i nutrients com la Tiamina (B1), Riboflavina (B2), niacina (B3), vitamina B6, biotina (B7), àcid pantotènic (B5), àcid fòlic (B9) i colina. Entre els aminoàcids es troben leucina, valina, alanina, serina, glicina, tirosina, lisina, prolina, treonina, arginina, cistina, histidina, isoleucina, metionina, fenilalanina, triptòfan, àcid glutàmic i àcids aspàrtics (dos Santos et al. 2014)(Aliyu and Bala 2011)(Mussatto et al. 2006).

Degut sobretot per la gran quantitat de residu que s'obté i l'alt nivell de fibres, s'ha estudiat àmpliament les possibles aplicacions pel bagàs, alguns autors resumeixen les possibles aplicacions en diferents articles. (Aliyu and Bala 2011; dos Santos et al. 2014; Mussatto et al. 2006; Kerby and Vriesekoop 2017). Entre aquestes aplicacions es troben: aliment humà o animal, producció de biogàs, proteïnes, fermentació per la producció de etanol, àcid làctic, gomes, antibiòtics, enzims, suport per la immobilització cel·lular, producció de most per obtenir cervesa amb baix contingut d'alcohol, cultiu de microorganismes, extracció d'olis, adsorció de metalls pesants i fabricació de maons per a la construcció.

La majoria de les aplicacions anteriors estan en fase d'experimentació i només s'han realitzats experiments al laboratori o escala pilot, però es preveu, degut a la gran varietat d'aplicacions i avanç en les tecnologies utilitzades, que en un futur pròxim serà un residu àmpliament reutilitzat, sobretot el si es produeix en grans quantitats.

L'ús més comú per les cerveseries més petites com les artesanes, és com a pinso animal per a pagesos locals o com a compost o fertilitzant del camps. També pot ser utilitzat per fornors locals, substituint part de la farina per farina produïda a partir de bagàs.

4.2. Hot trub i llúpols

El most té un alt contingut en nitrogen i durant l'ebullició perd aproximadament un 6% d'aquest degut a la formació d'un precipitat anomenat *hot trub*, format principalment per la coagulació de proteïnes de gran pes molecular. Aquestes molècules perden la solubilitat amb l'aigua quan s'escalfa i provoca la seva desnaturalització. Tanmateix hi poden haver altres substàncies a causa de la seva precipitació en la forma d'aquests complexos. Components del llúpols amb una baixa solubilitat també poden precipitar i components solubles poden interaccionar amb proteïnes insolubles causant-ne la precipitació. En menor mesura també pot contenir proteïnes de baix pes molecular que contenen en la seva estructura l'aminoàcid prolina que interactua amb polifenols i carbohidrats presents en el most. A més a més del *hot trub* es poden trobar restes de llúpols, sobretot quan s'utilitza el llúpols en flor. El residu és separat normalment utilitzant el mètode *whirlpool* i és considerat com un residu únic. (dos Santos et al. 2014)(Briggs et al. 2004)



Figura 15. Restes de llúpols i hot trub al fons de l'olla de cocció després del Whirlpool. Font: <http://www.lehuien.industrialmanufacturer.net>

La composició mitjana del *hot trub*, en matèria seca és de entre proteïnes (50-70%), components d'amargor no isomeritzats del llúpols (10-20%), polifenols (5-10%), carbohidrats (4-8%) entre els quals es troben pectina, glucans i midó, minerals (4-8% i àcids grassos (1-2%)(dos Santos et al. 2014). Normalment es formen entre 0,2 i 0,4 kg de *hot trub* per cada hectolitre de cervesa produïda amb una humitat de entre el 80 i 90%) (Briggs et al. 2004). Es pot recuperar most del residu a partir de mètodes de filtre de premsa, reixes o centrifugació i es pot emmagatzemar en un dipòsit a fora de la fàbrica fins que sigui recollit per una posterior utilitat.

El mètode més utilitzat per eliminar aquest residu és reutilitzant-los com a compost o fertilitzant. També s'ha estudiat com a font d'olis essencials que es poden utilitzar com a repel·lent d'insectes. L'amargor residual del llúpols fa que sigui gairebé impossible que s'utilitzi per a pinso animal però es pot barrejar amb el bagàs en petites quantitats (Kerby and Vriesekoop 2017).

4.3. Cold trub i restes de llevat

Durant el procés de fermentació el llevat es sol multiplicar entre 3 i 5 vegades dins del fermentador, sobretot en la primera fase de la fermentació quan hi ha alts nivells d'oxigen. Part d'aquest llevat precipita al cap d'un temps com també altres components que aporten terbolesa en la cervesa. Els restos de llevat s'han d'extreure del reactor per evitar l'autòlisi. La quantitat de biomassa residual generada depèn dels paràmetres de la fermentació (principalment l'aeració, la temperatura i el pH), el tipus de llevat, la concentració d'inoculació, la condició de viabilitat i vitalitat cel·lular i la composició del most. A més a més dels restos de llevat, en el fons del fermentador sedimenten proteïnes i altres substàncies degut al procés de refredament del most (*cold break*). Aquest residu es barregen amb el llevat sedimentat i es tracta en conjunt.



Figura 16. Restes de llevat extretes del fons del fermentador. Font: <http://www.winimi.co.uk>

Existeixen diferents mètodes per separar els restos de llevat de la cervesa. El més senzill és a través de purgues del fermentador, però es poden utilitzar centrifugadors per una millor separació. En general, les restes del procés de fermentació poden ser entre 1,5 i 3 kg per cada hectolitre de cervesa produïda i amb una humitat de entre el 85 i 90%. Els restos de llevat contenen cervesa que pot recuperar mitjançant diferents mètodes de filtració, centrifugació o premsa (Huige 2006). Els restos sòlids es poden emmagatzemar en un dipòsit fora de la fàbrica conjuntament amb els restos de llúpul i *hot trub*.

Els residus del llevat secs solen tenir alts continguts en proteïnes (entre un 35 i 60%) amb un alt valor biològic gràcies a la quantitat d'aminoàcids essencials en la seves estructures, que representen entre un 70 i 85% de caseïna. Els aminoàcids que estan presents en major quantitat són la lisina, leucina, isoleucina, valina, triptòfan, treonina i fenilalanina. Apart de les proteïnes també conté altres substàncies com carbohidrats (35-45%), minerals (5-7,5%) entre els quals es troben Ca, P, K, Mg i Fe, lípids (4-6%), Vitamines B, enzims i àcid ribonucleic (ARN)(dos Santos et al. 2014).

Es generen grans quantitats de residus amb alt contingut orgànic. Per cada hectolitre de cervesa produïda, conté al voltant de 0,25 kg de DBO i 0,17 kg de MES. Si es descarrega a la xarxa del clavegueram suposaria un augment significatiu d'aquests paràmetres (Huige 2006).

Entre les aplicacions es troben l'ús com a font de nutrients per nutrició humana o animal, creixement de microorganismes, com a font de proteïnes i vitamines o per desintoxicar efluent que contenen metalls pesants. (Kerby and Vriesekoop 2017; Huige 2006; Ferreira et al. 2010; dos Santos et al. 2014).



Figura 17. Tanc d'emmagatzematge de les restes de llúpol i llevat a l'exterior de la fàbrica. Font: pròpia

S'ha de dir, que el possible destí d'un residu, ja sigui el bagàs, les restes de llúpol o els restos de llevats, depèn molt de la quantitat en què s'obtenen, així les grans indústries cerveseres que produeixen grans quantitats d'aquests residus poden extreure'n algun valor afegit, venent els subproductes a tercers, però no és el cas de les petites cerveseres artesanes. Aquestes últimes sí que poden arribar amb acords amb altres empreses locals que puguin utilitzar els residus produïts com són pagesos tant del sector animal com vegetal i d'aquesta forma reciclar els residus generats.

Si s'observa la gran quantitat i varietat de possibles aplicacions que poden tenir aquests residus, s'ha de continuar amb l'estudi i millora dels processos de tractament per aconseguir en un futur poder utilitzar aquests residus a escala industrial d'una manera econòmicament viable.

4.4. Gestió dels residus

Les formes com es poden gestionar els residus, així com els procediments que s'han d'emprar, estan marcats pels preceptes que la legislació vigent a Catalunya en matèria de residus assenyala, segons el Decret legislatiu 1/2009, de 21 de juliol, pel qual s'aprova el Text refós de la Llei reguladora dels residus i el Decret 152/2017, de 17 d'octubre, sobre la classificació, la codificació i les vies de gestió dels residus a Catalunya, que estableix les vies de gestió dels residus que es produeixen o gestionen a Catalunya. La

classificació i codificació dels residus i les vies de gestió es troben en el Catàleg de Residus de Catalunya¹(CRC).

En el *Manual de gestió de residus industrials a Catalunya*² es recullen totes aquelles informacions que es consideren imprescindibles per als agents directament implicats en la gestió dels residus industrials: els productors, els transportistes i els gestors.

Productor

El productor és qualsevol persona, física o jurídica, l'activitat de la qual produeixi residus (les empreses gestores de residus també es consideren productors).

Obligacions i responsabilitats del productor:

Són obligacions dels productors o posseïdors de residus industrials:

- Gestionar els residus que produeixin de conformitat amb les determinacions del Catàleg de residus de Catalunya (CRC).
- Estar inscrit al Registre de Productors de Residus Industrials.
- Formalitzar correctament la Declaració anual de residus industrials.
- Formalitzar les fitxes d'acceptació, les fitxes de destinació i els fulls de seguiment dels diferents residus.
- Utilitzar per al transport dels residus generats empreses inscrites al Registre de Transportistes i amb autorització específica per al residu.
- Informar el transportista en el moment de formalitzar el transport sobre les característiques i perills dels residus a transport i sobre el mètode d'actuació en cas d'accident,
- Portar al dia un registre propi de residus.

¹ https://sdr.arc.cat/sdr/ListGrupsResidus.do#_ga=2.177659045.1636913299.1556006829-739965979.1540731603

² http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/residus_industrials/manual_de_gestio/manual.pdf

Transport

Sota la denominació de transport s'entén l'operació o conjunt d'operacions que permeten la recollida i trasllat dels residus.

No es necessita autorització de la Junta de Residus el transport de residus industrials quan:

- Es transportin quantitats inferiors a les especificades pel Catàleg de residus de Catalunya.
- El transport de residus adscrit al servei públic de recollida de residus municipals.
- El transport de residus de la construcció, enderrocs i runes.
- El transport de residus, a compte del destinatari, per espargir-los directament al sòl en profit de l'ecologia o per a un ús agrícola.
- El transport de residus que es gestionen com a subproductes.

D'acord amb el Catàleg de residus de Catalunya, pels residus de l'elaboració de cervesa artesana, igual que pels fangs produïts pel tractament d'aigües residuals, no es necessita autorització per un transport inferior a 1.000 kg. A més, si el destí dels residus és per a l'aplicació agrícola o quan es gestionen com a subproductes, tampoc és necessari l'autorització de transport.

Gestor

El gestor de residus és aquella persona, física o jurídica, que desenvolupa activitats d'emmagatzematge, valorització, tractament i/o disposició del rebuig de residus, ja siguin propis o de tercers.

Els residus industrials es poden gestionar mitjançant empreses inscrites al Registre General de gestors de Residus de Catalunya, com a subproductes o en sòls agrícoles en profit de l'agricultura.

Gestió de residus amb empreses inscrites al registre general de gestors:

Existeixen quatre models de gestió de residus industrials, dels quals tres es poden utilitzar pels residus industrials d'una cerveseria.

Model A) Estàndard (transports en quantitats superiors a les especificades pel CRC, 1.000 kg pels residus d'una cerveseria i els fangs de la depuració d'aigües residuals)

Documentació:

Fitxa d'acceptació (FA)

Full de seguiment (FS)

Full de seguiment itinerant (FI)

Model B) Valorització (transports en quantitats superiors a les especificades pel CRC (> 1.000 kg))

Documentació:

Full de seguiment (FS)

Full de seguiment itinerant (FI)

Full de seguiment itinerant (FI)

Model C) De petites quantitats (transports en quantitats inferiors a les especificades pel CRC (< 1.000 kg))

Documentació:

Fitxa d'acceptació (FA)

Full de seguiment itinerant (FI)

Justificant de recepció de residus (JRR)

En tots els cassos s'ha de caracteritzar, codificar el residu segons el Catàleg de residus de Catalunya (CRC) i determinar el destí més idoni segons el CRC.

Gestió com a subproductes

Són subproductes els residus que s'utilitzin com a substitut de productes comercials i/o primeres matèries i que siguin recuperables sense necessitat de sotmetre'ls a operacions de tractament. Queden exclosos els residus que s'apliquin al sòl en l'ús agrícola o en profit de l'ecologia.

La gestió de subproductes queda exempta d'efectuar la Full de seguiment (FS) i d'utilitzar un transportista del Registre de transportistes de residus.

L'empresa productora del residu ha de declarar la gestió com subproducte i l'empresa receptora ha de declarar la gestió del residu com a primeres matèries.

Gestió de residus orgànics en sòls agrícoles

Residus que posseeixen característiques fertilitzants pel seu contingut de matèria orgànica i elements nutritius, generats bàsicament per les estacions depuradores d'aigües residuals i les indústries agroalimentàries (cerveseria). Poden ser aplicats en sòls agrícoles en profit de l'agricultura seguint un dels dos models de gestió. Els residus que es poden aplicar se'ls assigna el codi de gestió R10.

Model dels gestors (aplicació mitjançant gestors)

Documentació:

Fitxa d'acceptació (FA)

Full de seguiment (FS)

S'ha de fer un anàlisi agronòmic del residu i comprovar la seva aptitud agrícola i contactar amb un gestor autoritzat.

Model d'aplicació directa (de l'aplicació directa dels residus pels productors o posseïdors)

Documentació:

Fitxa de destinació (FD)

Full de seguiment d'aplicació agrícola (FSA)

S'ha de fer un anàlisi agronòmic del residu i comprovar la seva aptitud agrícola, analitzar els sòls de les parcel·les receptores.

Documentació específica:

Pla d'adobatge: Pla d'aplicació del residu en cadascuna de les parcel·les agrícoles receptores es realitza en funció de l'anàlisi agronòmic del residu, el tipus de sòl i del cultiu a implementar. Els paràmetres mínims d'aquests anàlisis, que han de ser realitzades per un laboratori acreditat, són:

Residu: pH, conductivitat, matèria seca, matèria orgànica, nitrogen, fòsfor, potassi, calci, ferro i metalls pesants (Cd, Hg, Ni, Cu, Zn i Cr).

Sòl: Textura, pH, conductivitat, matèria orgànica oxidable, carbonat càlcic equivalent, nitrogen, fòsfor, potassi, magnesi i els metalls pesants (Cd, Hg, Ni, Cu, Zn i Cr)

Fitxa de destinació (FD): És l'acord que s'estableix entre el productor i destinatari.

Full de seguiment d'aplicació agrícola (FSA): Document que acompanya cada transport de residus orgànics destinats a sòls agrícoles, és responsabilitat del productor o posseïdor del residu.

Els residus industrials d'una cerveseria es classifiquen amb el codi 0207 en el Catàleg de residus de Catalunya (CRC), que fa referència als residus de la producció de begudes alcohòliques i no alcohòliques. A partir d'aquest codi i el CRC es troben les vies de gestió més recomanades per aquests residus. En la Figura 18 es mostren els codis de les vies de gestió separades en valorització i eliminació i ordenades per prioritat pels residus dins d'aquest grup, les definicions dels codis s'expliquen seguidament. Es prioritza sempre la valoració d'un residu per sobre de l'eliminació.







CER	Descripció	Transport	Classe	Prior.	Vies de gestió		
					Codis vigents		
					Valorització / Eliminació		
020701	Residus del rentatge, neteja i reducció mecànica de matèries primeres		NP	1	R0301	R0302	R0306
				1	R1001	R1002	
				2	R0101	R0102	R0103
				3	D0801	D0802	
				3	D0901		
				4	D1001		
020702	Residus de la destil·lació d'alcohols		NP	1	R0301	R0302	R0306
				2	R0101	R0102	R0103
				3	D0801	D0802	
				3	D0901	D0905	D0906
				4	D1001		
				5	D0502		
020703	Residus del tractament químic		NP	1	D0901		
				2	D0502		
020704	Materials inadequats per al consum o l'elaboració		NP	1	R0301	R0302	R0306
				2	D0801	D0802	
				2	D0906	D0908	
020705	Llots del tractament in situ d'efluents		NP	1	R0301	R0302	
				1	R1001	R1002	
				2	D0801	D0802	
				2	D0901	D0905	D0906
020799	Residus no especificats en cap altra categoria						

Figura 18. Vies de gestió de residus de la producció de begudes alcohòliques i no alcohòliques (excepte café, te i cacau).
Font: sdr.arc.cat

R03 (R0301, R0302 i R0306): Valorització material

Codi	Descripció
R03	Reciclatge o recuperació de substàncies orgàniques que no s'utilitzen com a dissolvents
R0301	Tractament biològic aerobi de residus orgànics (compostatge)
R0302	Tractament biològic anaerobi de residus orgànics
R0306	Reciclatge de residus orgànics per a la posterior fabricació o producció de nous productes

Taula 2. Descripció dels codis de gestió R03. Font: residus.gencat.cat

R10 (R1001 i R1002): Valorització material

Codi	Descripció
R10	Tractament dels sòls que produeixi un benefici en l'agricultura o una millora ecològica d'aquests sòls.
R1001	Valorització de residus en sòls agrícoles i en jardineria

R1002	Restauració de sòls
-------	---------------------

Taula 3. Descripció dels codis de gestió R10. Font: residus.gencat.cat

R01 (R0101, R0102 i E0103): Valorització energètica

Codi	Descripció
R01	Utilització principal com a combustible o una altra forma de produir energia
R0101	Utilització principal com a combustible en instal·lacions d'incineració de residus
R0102	Utilització principal com a combustible en la fabricació de ciment
R0103	Utilització principal com a combustible en altres instal·lacions de coïncineració

Taula 4. Descripció dels codis de gestió R01. Font: residus.gencat.cat

Disposició de rebuig:

D08 (D0801 i D0802): Tractament previ a eliminació

Codi	Descripció
D08	Tractament biològic que doni com a resultat compostos o mescles que es poden eliminar mitjançant altres operacions com el dipòsit sobre el sòl, tractament al medi terrestre, injecció en profunditat, embassament superficial, dipòsit controlat per a la operació, abocament al medi aquàtic, incineració a la terra, incineració al mar o emmagatzematge permanent.
D0801	Tractament biològic aerobi
D0802	Tractament biològic anaerobi

Taula 5. Descripció dels codis de gestió D08. Font: residus.gencat.cat

D09 (D0901): Tractament fisicoquímic previ a eliminació

Codi	Descripció
D09	Tractament fisicoquímic que doni com a resultat compostos o mescles que es poden eliminar mitjançant altres operacions
D0901	Tractament fisicoquímic
D0905	Evaporació
D0906	Assecatge tèrmic
D0908	Altres tractaments fisicoquímics

Taula 6. Descripció dels codis de gestió D09. Font: residus.gencat.cat

D10 (D1001): Incineració

Codi	Descripció
D10	Incineració a la terra
D1001	Incineració

Taula 7. Descripció dels codis de gestió D10. Font: residus.gencat.cat

D05 (D0502): Deposició controlada

Codi	Descripció
D05	Dipòsit controlat en llocs especialment dissenyats per a aquesta operació
D0502	Dipòsit controlat de residus no perillosos

Taula 8. Descripció dels codis de gestió D05. Font: residus.gencat.cat

En el cas dels residus de les indústries agroalimentàries, tant els residus orgànics com els fangs de depuradores d'indústries agroalimentàries tenen característiques fertilitzants pel seu contingut de matèria orgànica i elements nutritius, es poden valoritzar incorporant-los al sòl, amb l'objectiu de millorar les seves característiques estructurals i d'aportar nutrients als cultius.

Respecte a la valorització de residus orgànics biodegradables, com són els residus de la cerveseria, mitjançant les operacions R3 i R10, s'han de tenir en compte un seguit de consideracions:

Per avaluar l'aptitud agronòmica i la possibilitat de valorització agrícola, prèviament caldrà caracteritzar-los i fer-ne analítiques. Com a criteri general, les característiques i propietats dels residus orgànics a l'hora de considerar-ne la valorització agrícola són:

Característiques o propietats	Condicions desitjables per a un ús òptim	R 10	R 3
Variabilitat en la composició	Constància en la composició al llarg de l'any i dels anys		
pH	Evitar pH extrems	4,5-8,5	4-10
Salinitat	Baixa	≤ 8 dS/m	≤ 5 dS/m
Contingut en matèria orgànica (sms) ¹⁷ i grau d'estabilitat (GE) de la matèria orgànica	Contingut mínim de matèria orgànica	≥ 40%	≥ 40%
	Grau d'estabilitat (GE) ¹⁸ de la matèria orgànica	≥ 25 %	
Elements nutritius	Conèixer el contingut i de la facultat d'assimilació	N total, P total o K total ≥ 2% sms	
Metalls pesants	Continguts més baixos que els legalment establerts	Límits legals de l'RD 1310/1990	50% dels límits legals de l'RD 1310/1990
Microcontaminants orgànics i inorgànics	Nivells que assegurin la innocuïtat del producte		
Impureses (plàstics, vidres...)	Absència		

Taula 9. Característiques i propietats dels residus orgànics per considerar-ne la valorització agrícola. Font: residus.gencat.cat

R03: Reciclatge i recuperació de substàncies orgàniques que no s'utilitzen com a dissolvents

Les instal·lacions que valoritzin els residus orgànics produint i comercialitzant productes fertilitzants han de registrar-los i complir les especificacions del Reial decret 506/2013, de 28 de juny, sobre productes fertilitzants.

Per altre banda, per a residus per els quals el Catàleg de residus de Catalunya permet les operacions R0301 i R0302 són aplicables les operacions R1215 i R1216, relacionades amb operacions prèvies o parcials de tractament. Aquesta estructura permet distingir els tractaments en funció de si el seu objectiu és l'obtenció de productes fertilitzants o bé una estabilització biològica parcial dels residus.

Codi	Descripció
R12	Operacions prèvies o parcials de tractament
R1215	Estabilització aeròbia de residus orgànics en els quals el material obtingut no es considera un producte acabat, i per tant, s'ha de gestionar coma residu
R1216	Estabilització anaeròbia de residus orgànics en el quals el material obtingut no es considera un producte acabat, i per tant, s'ha de gestionar coma residu

Taula 10. Descripció dels codis de gestió D05. Font: residus.gencat.cat

R10: Tractament dels sòls que produeixi un benefici en l'agricultura o una millora ecològica d'aquests sòls

Aquesta via de gestió fa referència als residus orgànics i als fangs de depuradora que es gestionen i s'apliquen directament en sòls agrícoles com a fertilitzants (R1001) o que es destinen a la restauració de sòls (R1002). EN els dos casos, els residus han de tenir unes característiques fertilitzants que justifiquin l'interès agronòmic del seu reaprofitament (matèria orgànica i nutrients).

En el cas de fangs de depuradora, han de ser tractats d'acord amb allò que indica el Reial decret 1310/1990, pel qual regula l'ús de llots de depuració en el sector agrari.

La gestió de residus orgànics mitjançant la subvia de gestió R1001 s'haurà de realitzar d'acord amb les indicacions del *Manual de gestió dels residus orgànics per l'aplicació en sòls agrícoles*¹.

1

http://residus.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/tipus_de_residu/residus_organics/def_caracteristiques_ro/MANUAL.pdf

En funció dels anàlisis agronòmics del residu, els residus es classifiquen en tres grups: residus amb valor orgànic, residus amb valor fertilitzant i residus destinats a compostatge.

Característiques	Valor orgànic	Valor fertilitzant	Compostatge
Matèria seca (MS)	> 15%	-	> 15%
Matèria orgànica total (MOT) (sobre la matèria seca)	> 50%	>40%	>40%
Grau d'estabilitat (GE)	> 40%	>15%	-
Elements nutritius	-	N, P o K > 2%	-
pH	4,5 – 8,5	4,5 - 8,5	4 - 10
Índex de germinació	>70%	>60%	
Mida de partícules	<25 mm		
Metalls pesants	Límits legals	Límits legals	<50% límits legals

Taula 11. Comparació entre les característiques mínimes que ha de tenir un residu dels tres grups de residus. Font: Manual de gestió dels residus orgànics per l'aplicació en sòls agrícoles

En el cas de la subvia R1002 cal tenir en compte les especificacions del document *Utilització de fangs de depuradora en restauració. Manual d'aplicació en activitats extractives i terrenys marginals*¹.

D10 (incineració) i D05 (deposició controlada)

Aquestes operacions tenen la prioritat més baixa, per la qual cosa, d'acord amb la normativa i amb la jerarquia de gestió de residus, només són aplicables a un residu concret quan les operacions de valorització atribuïdes al residu que tenen una prioritat superior, no siguin factibles.

¹ http://aca.gencat.cat/web/.content/10_ACA/J_Publicacions/03-guies/05-protocol_fangs_2006.pdf

5. AIGÜES RESIDUALS

Les aigües residuals del procés d'elaboració de cervesa també són un residu del sistema, degut a la gran quantitat en què es produeix i la seva complexitat de tractament es dedica un capítol per explicar aquest residu.

Les aigües residuals es poden classificar en dos grups, les aigües residuals urbanes (o domèstiques) i les aigües residuals industrials. Les aigües residuals industrials són les que provenen de les diferents indústries i poden contenir diferents tipus de contaminants depenent de l'activitat que es dugui a terme. Les aigües residuals industrials no es poden barrejar amb les aigües urbanes per ser tractades, sinó que sovint requereixen d'un tractament específic depenent dels contaminants que conté abans de ser descarregades.

Els contaminants que es troben en les aigües residuals es poden classificar segons els següents paràmetres químics, dels quals també es descriu l'efecte que provoquen al medi receptor (Alemany et al. 2009):

Sòlids en suspensió sedimentables: Són la fracció de sòlids orgànics i inorgànics que sedimenten en una hora en un con Imhoff (Plymouth Technology 2014). Aquests sòlids es poden acumular en el fons d'un riu o lloc, reduint-ne la seva capacitat de filtració. També es poden descompondre la fracció orgànica, que consumeix l'oxigen del medi, reduint-ne la qualitat.

Sòlids en suspensió no sedimentables: Són la resta de sòlids en suspensió, la presència d'aquests sòlids al medi receptor provoca torbidesa en l'aigua, reduint el pas de la llum i per tant els processos fotosintètics.

Sòlids inorgànics solubles: Són els sòlids que es mantenen en dissolució després d'un procés de filtració. Representen majoritàriament les sals dissoltes que es troben en l'aigua i són les responsables de la salinitat. En cas de voler reutilitzar l'aigua un cop tractada pot ser necessari eliminar aquestes sals.

Matèria orgànica biodegradable: Representa la fracció orgànica que es pot oxidar biològicament. Es quantifica a partir de la demanda bioquímica d'oxigen (DBO). Generalment està composta per proteïnes, hidrats de carboni i greixos animals. Com a conseqüència de la presència d'aquesta matèria en les aigües receptores es pot consumir parcialment o totalment l'oxigen dissolt en l'aigua degut a la degradació de la mateixa matèria, reduint la qualitat del medi.

Matèria orgànica refractària: És la matèria orgànica que no es pot degradar biològicament. Depenent del tipus de compost que conté poden arribar a ser tòxics per a la vida aquàtica. Alguns exemples són pesticides, medicaments o productes de neteja.

Nitrogen: El nitrogen, juntament amb el fòsfor i el carboni, és un nutrient essencial per al creixement. Es pot trobar a l'aigua en tres formes diferents: pot formar part de compostos orgànics (nitrogen orgànic),

com a nitrogen amoniacal lliure (NH_4^+ o NH_3 depenent del pH) o com a nitrit i nitrat. El seu abocament directe al medi receptor provoca dos efectes: El nitrogen amoniacal es pot oxidar a nitrit o nitrat utilitzant l'oxigen present en l'aigua, i d'altra banda, si hi ha una baixa concentració d'oxigen, els òxids de nitrogen poden provocar un creixement intens d'algues que pot causar l'eutrofització del medi.

Fòsfor: Es pot trobar formant part de components orgànics (fòsfor orgànic) o com a polifosfat i ortofosfat (fòsfor inorgànic). Quan s'avoca al medi pot donar creixement d'algues causant problemes semblants a la presència de nitrats.

Metalls pesants: En certes concentracions poden ser tòxiques i per tant s'han d'eliminar. Sobretot si s'ha de reutilitzar l'aigua residual.

Patògens: L'aigua residual pot contenir organismes patògens que poden transmetre malalties contagioses. Es necessita una desinfecció complet de l'aigua un cop tractada si s'ha de reutilitzar.

A continuació es defineixen alguns paràmetres que es requereixen controlar i és important recordar:

- **MES o SS** (Matèria en suspensió): inclou tots els sòlids sedimentables i no sedimentables presents en l'aigua.
- **DBO₅** (Demanda biològica d'oxigen): Quantitat d'oxigen requerit per la matèria biodegradable transcorreguts 5 dies. S'utilitza per expressar la quantitat de matèria biodegradable present en l'aigua.
- **DQO** (Demanda química d'oxigen): Requeriment d'oxigen per la matèria orgànica total. Expressa la quantitat de matèria orgànica total present en l'aigua.

5.1. Tractament d'aigües residuals industrials

Les aigües residuals industrials varien molt en composició depenent del tipus de indústria i material processat. Els efluent poden ser molt carregats orgànicament, fàcilment biodegradables, molt inorgànics o potencialment inhibidors. Això vol dir que els valors de MES, DBO₅ i DQO poden ser de desenes de milers de mg/L. Degut als alts nivells de matèria orgànica, l'aigua residual industrial pot ser deficient en nutrients, el valor de pH molt freqüentment es troba molt més enllà que el rang entre 6 i 9 i es poden trobar alts nivells de metalls. Les característiques dels fluxos solen ser molt diferents als de les aigües residuals domèstiques ja que depenen de les operacions en la fàbrica i les matèries primeres utilitzades. Per conseqüència seria prudent avaluar les aigües residuals industrials, com també els requeriments pel tractament o pretractament d'aquest efluent. També seria prudent adquirir un coneixement de la naturalesa de l'operació de la fàbrica.

Un sistema de pretractament d'aigües industrials a la fàbrica és freqüentment obligatori abans de descarregar les aigües al clavegueram degut als extrems valors de pH que es poden trobar, la gran quantitat de DBO₅ i MES o la presència de metalls pesants entre altres substàncies. (Jern 2006).

la Generalitat de Catalunya va elaborar el Decret 130/2003, de 13 de maig, a partir de les previsions de la normativa europea com la Directiva 91/271/CEE i la Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu i del Consell, del 23 d'octubre, per la qual s'estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües. Els límits establerts dels paràmetres principals per l'abocament d'aigües residuals industrials a una depuradora municipal es mostren a la Taula 12. Tot i així aquests límits poden variar d'un municipi a un altre depenent de la capacitat de la depuradora.

Paràmetre	Límit	Unitat
DBO	750	mg/l
DQO	1.500	mg/l
MES	750	mg/l
T	40	°C
pH	6 - 10	-
Nitrogen	90	mg/l
Fòsfor	50	mg/l

Taula 12. Límits d'abocament dels paràmetres més importants de les aigües residuals de la indústria cervesera. Font: Decret 130/2003, de 13 de maig.

És molt important per el dissenyador i operador del sistema de tractament d'aigües tenir el màxim coneixement de les característiques de les aigües a tractar. Depenent de la composició de l'aigua residual es poden utilitzar diferents operacions unitàries en el sistema de tractament d'aigües residuals. A més, s'han de tenir en compte una sèrie de característiques de l'aigua, les que requereixen atenció són: la biodegradabilitat, la càrrega, el volum, variacions i les característiques específiques del corrent.

- **Biodegradabilitat:** Perquè una aigua residual industrial pugui ser tractada amb èxit per mètodes biològics ha de tenir quantitat de matèria orgànica que requereix eliminar i no hauria de presentar cap component que pugui inhibir el procés biològic. La quantitat de matèria orgànica present en una aigua residual s'indica pels valors de DBO₅ i la DQO. La diferència entre la DQO i la DBO equival a la matèria orgànica que no es pot degradar biològicament. La relació DQO:DBO₅ indica si l'aigua residual pot tractar-se biològicament. Perquè una aigua es pugui tractar biològicament, la relació DQO:DBO₅ ha de ser 2 o inferior.
- **Càrrega:** Els efluent industrials sovint tenen quantitats molt més grans de matèria orgànica que les aigües residuals domèstiques. Normalment, els processos biològics tracten la matèria orgànica dissolta i les partícules més grans es poden separar per mètodes físics.
- **Volum:** El volum d'aigua residual produïda per una indústria varia molt segons l'activitat que es dui a terme i de la seva grandària. Les fàbriques de producció de paper i cerveseries són casos d'indústries que produeixen grans quantitats d'aigua residual.
- **Variacions:** L'aigua residual industrial normalment no és generada equitativament durant les hores del dia, sinó que s'utilitza en moments puntuals. També poden existir variacions entre diferents èpoques de l'any, ja que la producció pot variar d'un mes a un altre.

- **Característiques específiques:** Depenent de la indústria que s'estigui tractant, l'aigua residual pot tenir certes característiques que poden tenir un impacte negatiu en l'equipament del sistema de tractament d'aigües o el seu rendiment. Les característiques més comunes són: la relació DQO:DBO, la quantitat de matèria en suspensió (MES), la quantitat d'olis i grasses, producció de escumes degut a detergents que dificulten l'aeració, productes de neteja que es fan servir per netejar l'equipament i altres productes que puguin causar problemes per tractar biològicament una aigua.

Tenir coneixements sobre el procés de fabricació pot ser útil per la comprensió de les característiques de les aigües residuals. És útil per una fàbrica recollir i analitzar les aigües residuals provenint de diferents parts del procés abans d'abocar-los al clavegueram.

5.2. Aigua residual de la indústria cervesera

El consum d'aigua en una cerveseria s'expressa com els hl d'aigua consumida per hl de cervesa produïda (hl aigua/hl cervesa), aquest valor pot variar molt però sol estar entre 2 i 8 hl aigua/ hl cervesa, la relació d'aigua residual a cervesa és normalment entre 1.2 i 2 hl/hl menys que la relació aigua/cervesa (Driessen and Vereijken 2003). Part de l'aigua es perd en els subproductes i per evaporació durant la cocció del most, mentre que una part acaba dins el producte final.

L'aigua residual provenint d'una indústria cervesera es caracteritza per tenir alts nivells de matèria orgànica, expressada com DQO, DBO i MES, també es poden trobar altes concentracions de nitrogen i fòsfor i es poden trobar valors extrems de pH o altes temperatures que no compleixin amb els límits establerts per la normativa. A la Taula 13 es mostren els paràmetres que s'han de tenir en compte quan es tracte l'aigua residual d'una cerveseria i el rang de quantitats en què es solen trobar (Driessen and Vereijken 2003). Aquests valors poden variar molt depenent de la quantitat d'aigua que s'utilitza durant el procés i el sistema de producció utilitzat.

La matèria orgànica present en l'efluent d'una cerveseria (expressat com DQO) és generalment fàcilment biodegradable ja que està compost principalment per sucres, midó soluble, etanol, àcids grassos volàtils, etc. Això ho remarca la relativament baixa relació entre DQO:DBO de 1,5-1,7. Els residus sòlids (MES) consten principalment de bagàs i el *trub*; els nivells de pH estan determinats pel tipus i quantitat de productes químics de neteja (sosa càustica, àcid fosfòric, àcid nítric, etc.). Els nivells de nitrogen i fòsfor depenen principalment del maneig de les matèries primeres i la quantitat de restos de llevat presents en l'aigua residual. En la Taula 13 es compara els rang de valors dels paràmetres de les aigües residuals d'una cerveseria amb els límits establerts de la Taula 12, es pot deduir que l'aigua residual provenint d'una cerveseria normalment necessita ser tractada en la pròpia indústria abans de ser descarregada. Depenent del procés d'elaboració pot ser que s'hagin de tractar més o menys paràmetres.

Paràmetre	Rang de composició	Límit	Unitat
DBO	1.200 – 3.600	750	mg/l
DQO	2.000 – 6.000	1.500	mg/l
MES	200 – 1000	750	mg/l
T	18 – 40	40	°C
pH	4,5 – 12	6 - 10	-
Nitrogen	25 – 80	90	mg/l
Fòsfor	10 – 50	50	mg/l

Taula 13. Paràmetres més importants en l'aigua residual d'una cerveseria. Font: (Driessen and Vereijken 2003), Decret 130/2003, de 13 de maig.

La producció de cervesa és un procés discontinu, és a dir, per lots. L'ús d'aigua durant el procés d'elaboració pot variar molt d'una etapa a una altre, així la majoria d'aigua és utilitzada en l'etapa de refrigeració del most calent i la neteja dels equips. A més, la concentració de contaminants pot variar molt depenent de l'activitat que es du a terme (manipulació de matèries primeres, separació del most, fermentació, neteja, etc.). A la Taula 14 es mostren les principals etapes on es produeix aigua residual en una microcerveseria i la concentració aproximada de DBO i MES del corrent o l'especificació d'algun altre paràmetre important. (Brewers Association, n.d.).

Font	Operació	Característiques
Tanc de maceració	Aclarir	Celulosa, sucres, aminoàcids. MES≈3.000 ppm DBO≈3.000 ppm
Bagàs	-	Celulosa, matèria nitrogenada. MES≈30.000 ppm, DBO fins a 100.000 ppm
Hot trub	-	Proteïnes, fangs i most. MES≈35.000 ppm, DOB≈85.000 ppm
Fermentador	Aclarir	Llevat. MES≈6.000, DBO fins a 100.000
Dipòsit de maduració	Aclarir	Cervesa, llevat, proteïnes. MES≈4.000 ppm, DBO≈80.000 ppm
Pèrdues de cervesa	Pèrdues, purgues, etc.	DBO≈1.000 ppm
Altres	Neteja de terres, etc.	Relativament poc MES i DBO però el problema és el pH

Taula 14. Fonts de contaminació de l'aigua residual. Font: (Brewers Association, n.d.).

Degut a la gran varietat de concentracions entre diferents etapes del procés, és molt important saber d'on provenen la majoria de contaminants. Saber quins corrents són els més significatius o quins corrents justament no contenen casi càrrega contaminant pot ser molt útil per dissenyar el sistema de tractament d'aigües. En cada cas en concret s'ha de buscar la solució més òptima i pot variar molt d'una fàbrica a una altre.

En Taula 14 s'observa que els residus sòlids (bagàs, *hot trub*, restes de llevat) contenen concentracions molt elevades de MES i DBO, per tant aquests residus han de ser separats de les aigües residuals de major forma possible ja que si aquests residus van a parar a les aigües residuals fan augmentar molt la càrrega orgànica a tractar, la qual cosa implicaria un cost superior de disseny i operació del sistema de tractament d'aigües. Tant el bagàs, el *trub*, les restes de llúpul i de llevat es poden separar en gran proporció, però sempre queden restes en els tancs que van a parar a les aigües residuals quan es netegen els equips. Separar aquest residus sòlids és el primer pas per reduir la concentració de matèria orgànica de l'aigua residual (Ockert 2002)(Brewers Associatoin, n.d.).

5.3. Procés de tractament

Una vegada són separats la majoria de residus sòlids l'aigua residual encara és molt concentrada en DQO, DBO, MES, a part de poder presentar valors desproporcionats de pH o T. Igual que en qualsevol altre depuradora, el tractament de l'aigua residual es du a terme en diferents etapes. Depenent de la quantitat d'aigua a tractar i la concentració dels contaminants en l'aigua, les etapes que s'han de dur a terme poden diferenciar. Hi poden haver diferents tractaments per un mateix paràmetre, els que es solen dur a terme en el tractament d'un efluent provenint d'una indústria cervesera es poden en dos parts: el pretractament i tractament primari. Generalment el primer inclou les etapes de filtració de sòlids i neutralització del pH i el segon inclou un tractament biològic que pot ser aeròbic o anaeròbic per eliminar la càrrega orgànica. Tot i així, el pretractament també pot incloure tractaments biològics si fos necessari depenent de la situació concreta del cas a tractar.

A la hora d'elegir el sistema de tractament d'aigües residuals d'una cerveseria es poden considerar diversos criteris socioeconòmics i ambientals. El procés ha de ser suficientment flexible per poder suportar grans fluctuacions de matèria orgànica i altres característiques de l'efluent, com també variacions en el cabal a tractar però alhora s'ha d'intentar minimitzar els costos de disseny i d'operació. (Kebede 2018).

5.3.1. Pretractament

Existeixen diverses maneres de dur a terme aquesta part del procés i depenent del cas concret que s'estudiï és millor fer-ho d'una forma o altre, però l'objectiu sempre és el mateix, es vol reduir el màxim la MES i regular el pH i la temperatura del corrent. Per això es comenten per separat els tractaments més utilitzats per cadascun d'aquests paràmetres.

Matèria en suspensió

El primer tractament de l'aigua residual que s'ha de fer en qualsevol cas és realitzar una filtració mecànica per eliminar el màxim els sòlids més grans com poden ser restes de gra i llúpul apart d'altres sòlids que hi poden haver que puguin causar problemes més endavant. D'aquesta forma es pot reduir considerablement la MES i consegüentment la DQO i DBO suposant una menor càrrega de

contaminants que queden per tractar. Un filtre amb un pas de llum d'entre 2 i 3 mm és el més recomanat. Els tamisos són els més utilitzats en aquest cas, poden ser fixos o rotatoris. El primer, és la opció més econòmica però té l'inconvenient que necessita una neteja manual periòdicament. La segona opció recull els residus sòlids en un costat i deixa sortir l'aigua filtrada per un altre, mantenint sempre l'entrada oberta però té un consum energètic. Els dos filtres funcionen per gravetat, pel que l'aigua ha de ser elevada mitjançant una bomba o el sistema de tractament ha d'estar situat per sota el nivell de la sala de producció, per exemple sota terra. Els sòlids eliminats d'aquesta forma formen un residu més de la fàbrica i han de ser dipositats correctament, els sòlids eliminats es poden barrejar amb el bagàs per ser reaprofitats.

pH i temperatura

Un cop el corrent és filtrat i s'han eliminat els sòlids més grans i part de la MES, és important regular el pH per dos raons principals: Depenent del producte que s'utilitzi a la hora de netejar els equips, l'aigua residual pot tenir nivells de pH molts alts (producte bàsic) o pH molt baixos (producte àcid). Per altre banda, si es vol realitzar un tractament biològic posterior, és necessari realitzar-lo a un pH el més constant possible a més que valors extrems maten els microorganismes necessaris per realitzar un tractament biològic. Cosa semblant passa amb la temperatura, si es vol instal·lar un sistema biològic la temperatura s'ha de mantenir el més constant possible i dins un rang de temperatures. La regulació del pH es sol fer en un dipòsit agitat, anomenat tanc d'homogeneïtzació. Un dipòsit correctament agitat necessita un temps de residència entre 15 i 30 minuts per neutralitzar el pH (Ockert 2002). Depenent de la quantitat d'aigua a tractar pot ser suficient un sol tanc d'homogeneïtzació o s'han de instal·lar més d'un tanc en sèrie.

Tractaments de floculació i sedimentació no són recomanables per tractar les aigües residuals d'una cerveseria degut a que les densitats dels sòlids suspesos és molt semblant a la de l'aigua i suposaria un gran temps de retenció.

Existeixen altres tecnologies per tractar els sòlids més fins com són les membranes de microfiltració o ultrafiltració, que a part de tenir un cost elevat requereixen d'un manteniment periòdic.

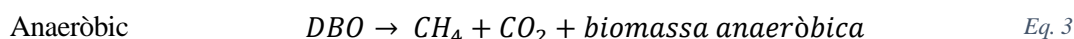
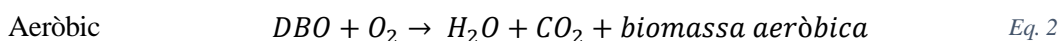
5.3.2. Tractament biològic

Un cop s'ha regulat el pH i la temperatura del procés i s'ha eliminat una part de la matèria orgànica es pot passar a un tractament biològic de l'aigua residual. Les partícules fines que no han estat separades anteriorment i els sòlids dissolts es poden degradar per un tractament aeròbic o anaeròbic utilitzant microorganismes. Aquests microorganismes poden ser diferents varietats de bacteris, fongs, algues, etc. depenent del residu tractat. En el cas del residu d'una cerveseria són principalment bacteris.

Els microbis són sensibles a la temperatura i al pH, el primer hauria d'estar entre 30 i 35°C i el segon ha d'estar en un rang d'entre 5 i 9, sent entre 6,5 i 7,5 el rang òptim. A més, els microbis tenen una necessitat

nutricional, normalment els residus de l'indústria cervesera conté tots els nutrients necessaris (fosfats, calci, magnesi, sulfat) però a vegades necessita un nitrogen amoniacal extra per mantenir un creixement saludable. La relació DBO/nitrogen/fòsfor ha de ser 100:5:1 per operar òptimament.

Hi ha dos opcions per tractar l'aigua residual biològicament: Digestió aeròbica o digestió anaeròbica. Els microbis aeròbics que utilitzen gasos (majoritàriament oxigen) per créixer i oxidar la matèria orgànica (DQO) per produir aigua i diòxid de carboni. Els microbis anaeròbics digereixen la matèria orgànica en absència d'oxigen i produeixen gasos (majoritàriament metà i diòxid de carboni en menor mesura/proporció). Els dos processos produeixen uns fangs de biomassa, els quals s'han de retornar o quedar parcialment dins del sistema ja que formen els microbis que han de dur a terme la digestió i s'ha de descartar l'excés de biomassa. Els fangs sobrants que s'eliminen del sistema són un residu que s'ha de tenir en compte i requereixen d'un tractament per ser reutilitzats. Les reaccions principals del procés aeròbic i anaeròbic es mostren en la Eq. 2 i la Eq. 3 respectivament.



5.4. Elecció del reactor biològic

S'ha estudiat àmpliament l'ús de reactors biològics pel tractament d'aigües residuals d'una cerveseria (Kebede 2018; Driessen and Vereijken 2003). Per elegir el sistema de tractament òptim pel cas de la cerveseria estudiada, es busca un sistema que compleixi amb els següents requisits:

- Tractar un cabal diari reduït d'aigua residual.
- Mínima superfície possible, ja que es disposa d'un espai reduït per la instal·lació de l'EDAR.
- Suportar variacions de cabal (els cabals són molt irregulars de forma diària, setmanal i entre diferents estacions de l'any)
- Suportar variacions de càrrega contaminant (la composició de les aigües de la cerveseria depenen del procés que s'estava fent i poden variar entre elles).
- Suportar temperatures inferiors a 0°C.
- Cost d'inversió reduït.

Els reactors anaerobis són cada vegada més utilitzats pel tractament d'aigües residuals de cerveseries, sobretot per la possibilitat de recuperar metà del procés, el qual es pot reaprofitar en la fàbrica després d'un procés de purificació. El seu rendiment és inferior que els reactors aerobis pel que s'està estudiant una combinació dels dos tractaments, realitzant primer un tractament anaerobi seguit d'un tractament aerobi per aprofitar els avantatges dels dos casos. Degut l'elevat cost d'inversió dels reactors anaerobis i que no és rentable recuperació el gas metà per una instal·lació de petita escala, es descarta utilitzar aquest tipus de reactors.

Entre els sistemes aerobis, existeixen sistemes amb biomassa en suspensió i de biomassa fixada, presentant millor rendiment els reactors amb biomassa en suspensió (Ling and Lo 2015).

Els fangs activats són els sistemes més utilitzats pel tractament d'aigües residuals, tant domèstiques com industrials, consisteix en introduir l'aigua residual en un reactor que conté un cultiu de microorganismes en suspensió al qual s'aporta aire per aconseguir que la matèria orgànica s'oxidi biològicament a diòxid de carboni i aigua. Seguidament es separen l'aigua tractada dels sòlids en suspensió (fangs creats) en un decantador. Els microorganismes consumeixen l'oxigen i els aliments en el substrat (matèria orgànica biodegradable present en l'aigua residual) per obtenir energia per mantenir les seves funcions vitals i generar nous individus.

Els tancs reactors disposen d'equips per a la transferència d'oxigen i manteniment dels fangs en suspensió dins del reactor. Existeixen diferents tipus de configuracions de fangs actius, mereix especial atenció l'únic reactor discontinu de fangs activats:

Reactor discontinu seqüencial (SBR): És un sistema que funciona per lots, consta de quatre etapes: ompliment, reacció, sedimentació i buidatge. El sistema només està format per un sol dipòsit on es du a terme tot el tractament. És un procés molt eficient pel que fa a cost i rendiment d'eliminació de matèria orgànica. L'estalvi d'espai i la possibilitat d'assumir cabals i càrregues variables, modificant els cicles d'operació, són les grans avantatges. En funció del tractament que es vulgui donar a l'aigua es poden modificar les etapes del cicle.

També existeixen reactors de membrana, que combinen el sistema de fangs actius amb tecnologies de membrana, tenen un cost molt més elevat d'instal·lació en comparació amb els sistemes SBR i per això es descarta.

S'elegeix el reactor seqüencial per càrregues (SBR) per complir amb tots els criteris marcats:

- Possibilitat de tractar petits cabals d'aigua residual.
- Versatilitat per treballar amb fluctuacions de cabal i de concentració de matèria orgànica.
- Gran flexibilitat de funcionament, tant de la duració dels cicles com del mètode d'operació de les etapes.
- Baix requeriment d'espai degut a que només es requereix un sol tanc per realitzar tot el procés.
- El tanc pot ser enterrat, el que permet un correcte funcionament del reactor encara que la temperatura ambient sigui per sota de 0°C.
- Menor cost d'inversió que els sistemes convencionals de tractament biològic degut a la menor necessitat de terreny i equips.

6. REACTOR SBR

El reactor discontinu seqüencial (*Sequencing Batch Reactor, SBR*) és un sistema de fangs activats pel tractament d'aigües residuals tant domèstiques com industrials. Es caracteritza per utilitzar cicles d'emplenament i descàrrega, en aquest sistema, l'aigua residual entra en una tanda en un reactor únic parcialment ple que conté biomassa, rep un tractament per remoure els components indesitjables i es descarrega. Tant l'aeració com la sedimentació s'aconsegueixen en aquest mateix reactor. Els sistemes SBR són especialment efectius per tractar corrents de cabals reduïts i/o intermitents. Tot i que existeixen diferents tipus de SBR, en aquest projecte es considera un SBR biològic amb biomassa en suspensió (Wang and Li 2009).

Entre les avantatges d'aquests sistemes s'inclouen: la possibilitat d'ajustar i canviar la duració de les diferents etapes, el control de cada reacció biològica i la qualitat de l'afluent el qual permet treballar amb variacions tant de caudal com de contaminants. A més, com la sedimentació es du a terme en el mateix tanc del reactor, no és necessari un sedimentador secundari, disminuint tant el volum ocupat de la instal·lació com els costos d'inversió.

Els desavantatges del sistema és que es requereix un major nivell de sofisticació de les unitats de programació i control del sistema.

L'operació d'un reactor SBR, com s'ha dit, es basa en el principi emplenament – descàrrega, el qual consisteix de 5 etapes: Emplenament, Reacció, Sedimentació, Descàrrega i Inactivitat, com es mostra a la Figura 19. Les diferents etapes d'un tractament en un SBR tenen lloc en un període de temps anomenat cicle (Irvine 1989; Gürtekin 2014).

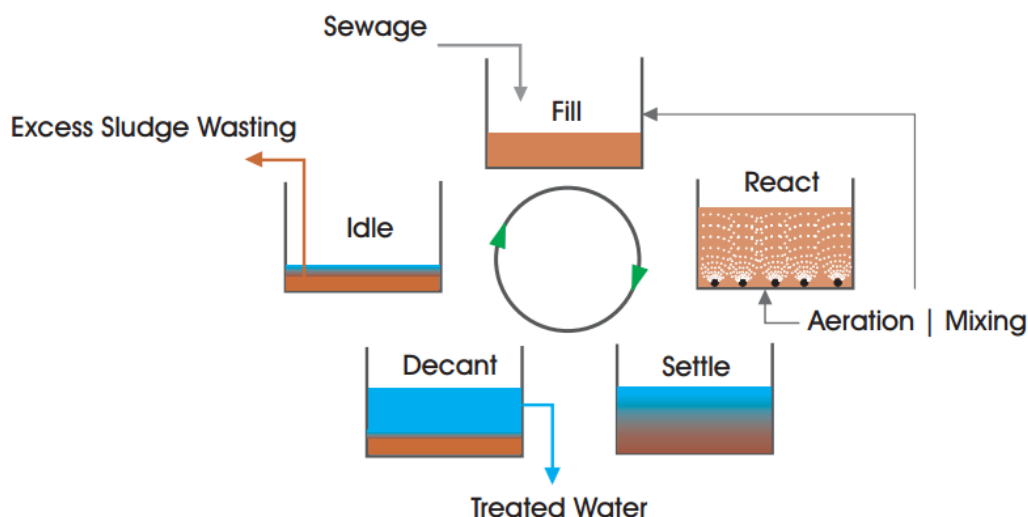


Figura 19. Etapes d'un SBR. Font: <http://www.ethicsinfinity.com>

Etapa d'Emplenament

El cicle s'inicia amb el reactor parcialment ple, amb el fang activat decantat del cicle anterior. Durant l'etapa d'emplenament s'introdueix l'afluent en el reactor fins completar el 100% del volum. L'afluent aporta els aliments necessaris per la biomassa, formada principalment per bacteries. L'emplenament es pot realitzar combinant etapes agitadaes anòxiques i aeròbiques, també és possible realitzar l'emplenament o una part de la mateixa sense agitació i aeració depenent dels objectius de depuració.

Etapa de Reacció

És l'etapa on es produeix la major eliminació de matèria orgànica. Igual que l'etapa d'emplenament, es pot realitzar combinant etapes de mescla i aeració per obtenir els resultats desitjats. Que s'expliquen breument més endavant.

Etapa de Sedimentació

En aquesta etapa no s'agita ni s'aireja per aconseguir condicions de repòs. Es produeix la separació del fang de l'aigua residual, on el fang queda sedimentat al fons del reactor. Gràcies a que la sedimentació és estàtica, es produeix millor que en els processos continus de fangs activats.

Etapa de Descàrrega

Es descarrega l'efluent fins deixar el volum inicial del reactor. S'utilitzen decantadors per extreure l'efluent tractat, en general, s'utilitzen existeixen decantadors flotants i fixes, els primers presentant més avantatges en relació amb els segons.

Etapa d'Inactivitat

L'etapa d'inactivitat té lloc entre les etapes de descàrrega i emplenament, és la fase en la que el reactor roman parat fins l'inici del següent cicle. En aquesta etapa normalment es produeix la purga del fang.

La purga del fang és un factor important en el funcionament del sistema, afectant-ne el rendiment. No existeix un moment determinat per l'eliminació del fang sobrant dins del cicle de funcionament però es sol realitzar durant la fase de sedimentació o d'inactivitat. La purga del fang fa que d'un cicle al següent es mantingui una relació de masses gairebé constant entre el substrat affluent i la biomassa en el reactor.

6.1. Equipaments i instrumentació d'un SBR

El sistema SBR sol consistir d'un tanc, els equips d'aeració i mescla, un decantador de l'efluent i un sistema de control que juntament amb interruptors i vàlvules regulen la seqüència i duració de les diferents operacions.

Sistema de mescla

La mescla és necessària per:

- Aconseguir una bona distribució dels constituents de l'aigua residual i la biomassa present al reactor.
- Mantenir els flocs en suspensió.

La mescla es pot aconseguir mitjançant diferents aparells:

- Mescladors fixes: poden ser horitzontals o vertical
- Mescladors flotants
- Sistemes d'aeració

Sistema d'aeració

L'aeració compleix un doble propòsit: primerament subministrar l'oxigen necessari pel metabolisme bacterià i l'oxidació dels contaminants però també mesclar el contingut del reactor amb l'objectiu de mantenir els sòlids en suspensió i distribuir-los homogèniament en el tanc.

L'oxigen es subministra mitjançant aeració difusa, en la que es fa passar gas comprimit a través de difusors submergits, els quals poden ser difusors porosos, difusors no porosos o ruixadors.

Els més utilitzats són els difusors porosos, que són membranes, de ceràmica o plàstic flexible, en forma de cúpula, discs, tubs o plats. L'aire és forçat a través dels difusors porosos formant petites bombolles.

Tanc

Els tancs poden ser rectangulars o circulars, per instal·lacions petites els tancs circulars són més recomanats. Els tancs solen estar coberts per protegir el sistema del fred, pluja i evitar males olors.

Els materials utilitzats són molt diversos, però els més utilitzats són l'acer, el formigó i la fibra de vidre. Per a sistemes grans es solen construir de formigó i pels sistemes petits de fibra de vidre.

Decantador

Perquè un sistema SBR funcioni correctament necessita un sistema de decantació per descarregar l'aigua tractada un cop han sedimentat els fangs al fons del dipòsit. Per a dipòsits grans existeixen decantadors específics per a sistemes SBR, però aquests no són aplicables a dipòsits petits degut a la grandària del decantador.

El decantador preferiblement ha de seguir el nivell de l'aigua mentre es buida el dipòsit (decantadors flotants) i hauria d'extreure el líquid entre 10 i 15 cm per sota la superfície per evitar les possibles espumes formades d'entrar al decantador.

Sensors i temporitzadors

La monitorització i control automàtic dels sistemes SBR requereixen la utilització de sensors que informin sobre l'estat i funcionament del procés. L'automatització del sistema està basada en l'ús de temporitzadors i senyals de sensors.

Com a mínim, els sensors requerits en una instal·lació SBR són:

- Temporitzadors
- Sensor de concentració
- Sensor de nivell

Els temporitzadors controlen les bombes, compressors i agitadors, i per tant, les etapes del procés (emplenament, reacció, sedimentació i descàrrega). Els sensors que mesuren la concentració d'oxigen són necessaris per controlar els requeriments d'aeració del sistema. Els sensors de nivells es poden utilitzar pel control de bombes i/o com a sistema de seguretat per vessaments.

Adicionalment, també es poden instal·lar sensors de pH, temperatura i redox, factors que influeixen en el creixement bacterià o sensors de nivell de fangs sedimentats per controlar l'etapa de sedimentació.

6.2. Fonaments de l'oxidació biològica

Durant l'oxidació biològica microorganismes eliminen matèria orgànica present en l'aigua residual (Figura 20). Part de l'aliment o residu inicial es converteix a més cèl·lules microbianes mitjançant una sèrie de reaccions metabòliques (assimilació). L'altre part dels reactius és oxidat completament fins als productes finals (dissimilació). A través d'aquesta última reacció els organismes vius obtenen la seva energia pel seu creixement. També es produeixen minerals, diòxid de carboni, aigua i una mica d'amoníac. Quan s'acaba la font d'aliments, la massa microbiana és consumida per auto-oxidació. El funcionament efectiu del procés d'oxidació biològica requereix suficient oxigen i nutrients en tot moment i resulta en l'acumulació de biomassa microbiana. Els requeriments d'oxigen de la planta, els nutrients i la quantitat d'excés de fangs produïts depenen del tipus de residu que es tracti, tant en composició química com de la càrrega del sistema (Vriens et al. 1990).

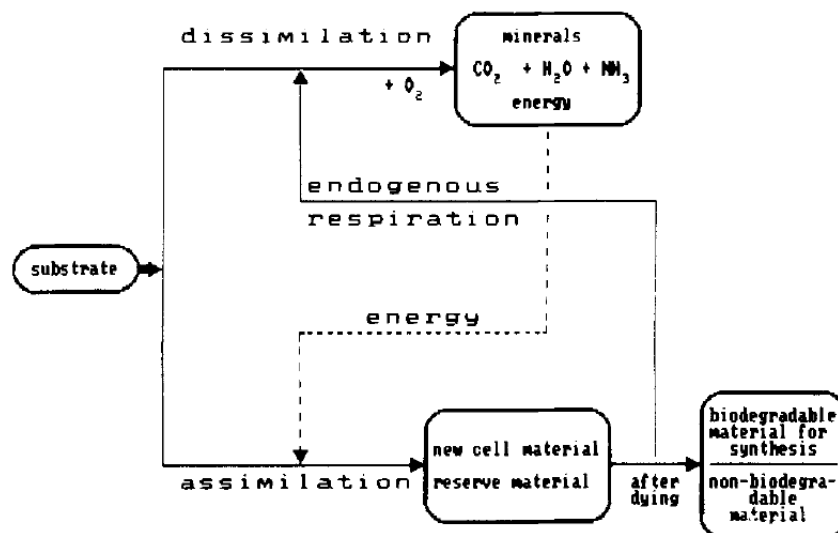
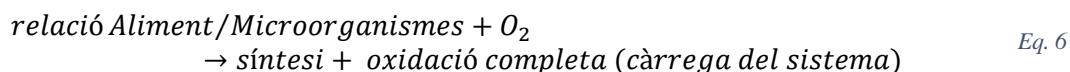
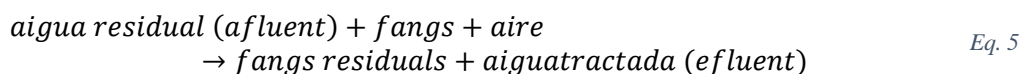
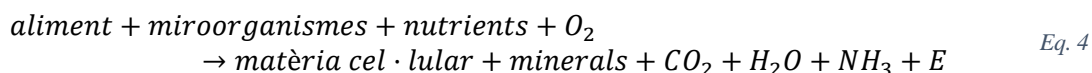


Figura 20. Assimilació i dissimilació de carboni durant el tractament aerobi d'aigües residuals. Font: (Vriens et al. 1990)

En les Eq. 4, Eq. 5 i Eq. 6 es representa de forma resumida les fórmules per al procés global del tractament per oxidació bioquímica. Hi ha moltes reaccions involucrades, molt més complexes.



6.2.1. Procés d'oxidació biològica

Per comprendre el procés d'oxidació biològica cal revisar les característiques de creixement dels microorganismes amb el temps, quan són sotmeses a un subministrament d'aliments en excés.

En la Figura 21 es representa la corba massa-temps en un procés discontinu. Es divideix en tres fases: creixement logarímic o exponencial, fase estacionària o de creixement lent i fase endògena.

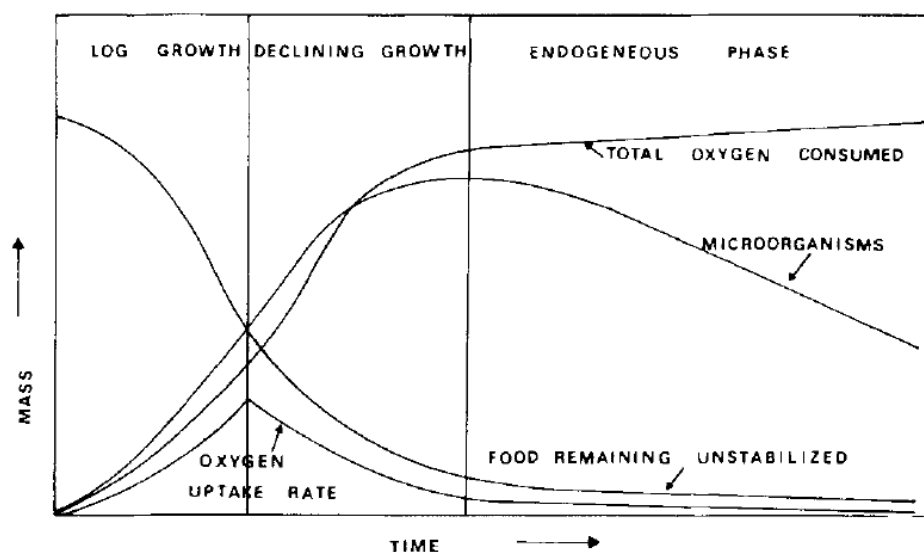


Figura 21. Corba massa-temps durant operacions discontinues. Representant l'aliment (o residu), els microorganismes i l'oxigen consumit. Font: (Vriens et al. 1990)

Creixement logarímic o exponencial: Inicialment, hi ha un augment molt ràpid de la població de microorganismes acompanyada d'una ràpida disminució de la quantitat d'aliments o residus disponibles. Alhora, hi ha un augment proporcional de la taxa d'ús d'oxigen, així com un augment continu de la quantitat d'oxigen consumit. Aquesta fase es caracteritza per una alta relació aliment/microorganismes (F/M) que disminueix amb el temps. Es produeix sobretot la síntesi i producció de matèria cel·lular, només es forma suficient aigua i diòxid de carboni per mantenir l'energia. Els requeriments globals d'energia són mínims.

Fase estacionària o de creixement lent: En algun moment, la quantitat d'aliments restants limita la taxa de creixement de microorganismes. És una situació on hi ha una massa de microorganismes però no hi ha prou aliment, en aquesta fase comença en punt d'inflexió tant de la corba d'aliment com de microorganismes. La taxa de creixement microbià i d'utilització d'oxigen comencen a disminuir i el canibalisme entre els microorganismes augmenta. Els microorganismes més grans i bacteris han de treballar més per alimentar-se, requereixen més energia i es produeixen més productes finals (CO_2 i H_2O). La quantitat de síntesi i la quantitat d'oxidació completa són igual però els requisits globals d'oxigen són majors.

Fase endògena: Comença quan la quantitat de productes d'oxidació completa supera la quantitat de productes de síntesi. Les relacions aliment/microorganismes són cada vegada més baixes i es comença la fase de mort de microorganismes. La font d'aliments desapareix ràpidament i els microorganismes s'han s'alimenten d'ells mateixos. La síntesi disminueix i es produeixen cada vegada més productes finals. Mentre que la taxa d'ús d'oxigen es fa menor, el requisit general d'oxigen és més elevat. Aquesta és la fase d'oxidació més completa i la producció de sòlids o fangs és mínima.

6.3. Microbiologia del sistema de fangs activats

A diferència de les fermentacions industrials com és d'elaboració de cervesa, on s'utilitzen cultius purs de microorganismes, l'oxidació biològica utilitza un cultiu mixt de microorganismes àmpliament trobades a la natura.

Quan es sotmet a un subministrament excessiu d'aliments, totes les formes de microorganismes comencen a créixer i es multipliquen. El creixement de qualsevol microorganisme, ja sigui protozous, bacteris, algues, etc. depèn del requisit metabòlic individual de l'organisme, de la naturalesa química del menjar i del medi físic.

S'ha intentat correlacionar la presència dels diferents organismes microscòpics més alts en el procés d'oxidació biològica amb l'eficiència del tractament i la salut general de la planta. L'examen microscòpic hauria de proporcionar informació sobre l'eficiència del tractament, la salut de la població i advertir sobre el mal funcionament físic real. Així les formes més grans són les més sensibles i es maten fàcilment per canvis ambientals no desitjats, l'absència de protozous assenyalen problemes per davant, pel que s'hauria de poder correlacionar la presència de protozous amb el rendiment del procés.

A partir de la Figura 22 és possible seguir la seqüència de patrons de vida a mesura que es produeixen per els protozous en passar d'una càrrega molt alta a una molt baixa, incrementant el temps.

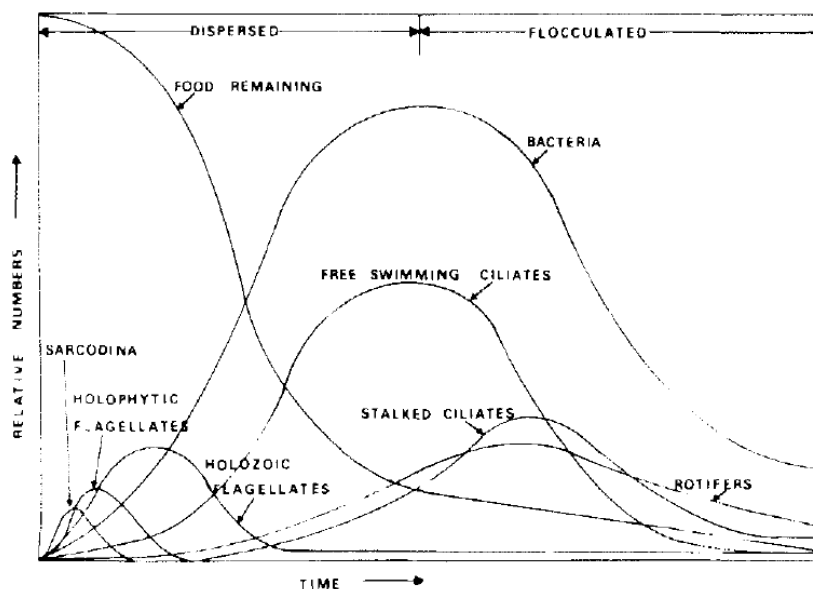


Figura 22. Successió de poblacions microbianes amb el temps i augmentant l'eficiència de la depuració aeròbica d'aigües residuals. Font: (Vriens et al. 1990)

A continuació es dona una guia general sobre el predomini relatiu dels protozous i l'eficiència en un procés d'oxidació biològica:

1. Els *Sacordina* només predominen en sistemes que comencen o es recuperen després d'una intoxicació completa.
2. Els *flagel·lats holofítics (holophytic flagellates)* es produeixen a baixa eficiència quan la concentració de residus orgànics és alta. En alguns sistemes d'alta concentració de DBO, l'eficiència pot ser alta matemàticament, però encara hi haurà una alta concentració de matèria orgànica que quedi a l'efluent.
3. Els *flagel·lats holozoics (holozoic flagellates)* segueixen la disminució dels *flagel·lats holofítics*. Indiquen un sistema una mica més eficient.
4. Els *ciliats* es troben quan hi ha un gran nombre de bacteris lliures. L'eficiència del sistema quan predomina és del 50%. Quan estan acompanyats de flagel·lats, els *ciliats lliures (free-swimming ciliates)* indiquen una eficiència una mica menor, mentre que la presència d'alguns *ciliats fixos (stalked ciliates)* indiquen una major eficiència.
5. El predomini de *ciliats fixos* indica un fang activat amb un efluent baix de DBO. Els *rotífers* estan presents a una càrrega de DBO molt baixa i alta eficiència.

6.3.1. Cinètica de creixement

Per assegurar el creixement dels microorganismes, se'ls ha de permetre un temps de permanència en el sistema suficient perquè es reproduïxin. Aquest temps depèn de la taxa de creixement, que està directament relacionada amb la velocitat a la que metabolitzen el substrat.

La taxa de creixement de cèl·lules bacterianes es pot definir mitjançant l'expressió:

$$r_x = \mu X \quad \text{Eq. 7}$$

On:

r_x = Taxa de creixement bacterià (massa/ volum · temps)

μ = Taxa de creixement específic de microorganismes (temps⁻¹)

X = Concentració de microorganismes (massa/ volum)

Donat que s'ha observat que la quantitat de cèl·lules noves produïdes és la mateixa per un substrat determinat, s'ha desenvolupat la següent relació entre la taxa de creixement i el grau d'utilització del substrat:

$$r_x = -Yr_s \quad \text{Eq. 8}$$

On:

r_s = Taxa d'utilització de substrat (massa/ volum · temps)

Y = Coeficient de producció màxima, definit com la relació entre la massa de cèl·lules formades i la massa de substrat consumit (massa/ massa)

El valor de Y depèn de:

1. L'estat d'oxidació del substrat
2. El grau de polimerització del substrat
3. Les vies metabòliques
4. Diversos paràmetres físics de cultiu

Igualant les Eq. 7 i Eq. 8:

$$r_s = -\frac{\mu}{Y}X \quad \text{Eq. 9}$$

Es defineix **q** com la *taxa específica d'eliminació de substrat*, que és la massa eliminada de substrat per unitat de microorganismes i per unitat de temps. Així doncs:

$$r_s = -qX \quad \text{Eq. 10}$$

A partir de les Eq. 9 i Eq. 10:

$$q = \frac{\mu}{Y} \quad \text{Eq. 11}$$

Experimentalment, s'ha pogut determinar que l'efecte de disposar de quantitats limitades de substrats, normalment, es pot definir adequadament mitjançant l'expressió desenvolupada per Monod la taxa de creixement específic:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} \quad \text{Eq. 12}$$

On:

μ_m = Màxima taxa de creixement específic (temps⁻¹)

S = Concentració de substrat que limita el creixement (massa/volum)

K_S = Constant de velocitat meitat, concentració de substrat a la meitat de la màxima taxa de creixement (massa/volum)

L'efecte de la concentració de substrat sobre la taxa de creixement específic s'il·lustra en la Figura 23.

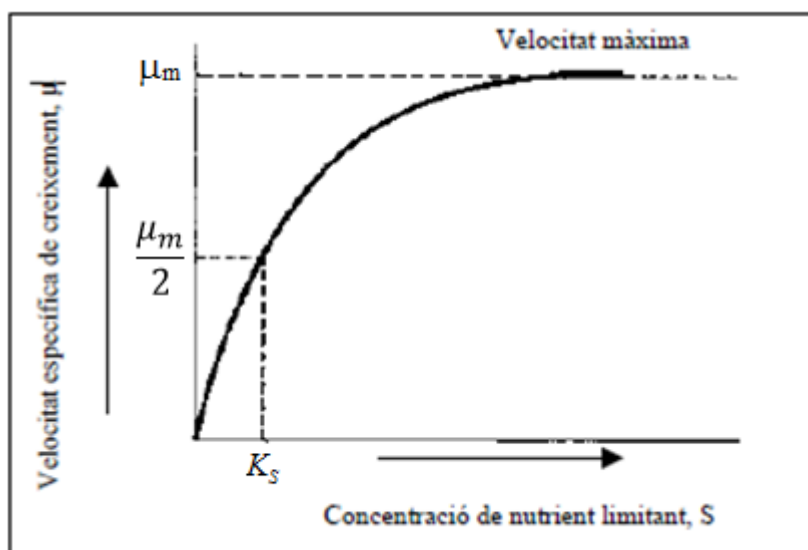


Figura 23. Representació dels efectes del substrat limitant sobre la velocitat específica de creixement.

Si es combina l'expressió de Monod (Eq. 12) amb les Eq. 7 i Eq. 9, s'obté:

$$r_x = \mu_m \frac{SX}{K_S + S} \quad \text{Eq. 13}$$

$$r_s = -\frac{\mu_m}{Y} \frac{SX}{K_S + S} \quad \text{Eq. 14}$$

Es defineix:

$$k_m = \frac{\mu_m}{Y} \quad \text{Eq. 15}$$

On:

k_m = Taxa màxima d'utilització de substrat per unitat de microorganismes.

Combinant les Eq. 11, Eq. 14 i Eq. 15 amb l'expressió de Monod (Eq. 12), la taxa específica d'eliminació de substrat queda definida com:

$$q = k_m \frac{S}{K_S + S} \quad \text{Eq. 16}$$

En els sistemes bacterians que s'utilitzen en el tractament biològic d'aigües residuals, la distribució de les edats cel·lulars es tal que no totes les cèl·lules del sistema estan en fase de creixement exponencial. Per conseqüència, l'expressió de la taxa de creixement s'ha de corregir per tenir en compte l'energia necessària pel manteniment cel·lular. També s'han de tenir en compte altres factors com la mort i la depredació. Generalment aquests factors s'engloben en un únic, i es suposa que la disminució de la

massa cel·lular causada per ells és proporcional a la concentració de microorganismes presents. Aquesta disminució s'identifica com a descomposició endògena i es pot formular de la següent manera:

$$r_d = -k_d X \quad \text{Eq. 17}$$

On:

k_d = Coeficient de descomposició endògena (temps⁻¹)

Combinant les Eq. 13 i Eq. 17, s'obté la taxa neta de creixement microbià:

$$r'_x = \mu_m \frac{SX}{K_S + S} - k_d X \quad \text{Eq. 18}$$

A partir de Eq. 14 i Eq. 15, s'obté l'expressió de la taxa d'utilització de substrat:

$$r_s = -k_m \frac{SX}{K_S + S} \quad \text{Eq. 19}$$

Els efectes de la descomposició endògena sobre la producció neta de microorganismes es tenen en compte al definir una producció observada dels mateixos:

$$Y_{obs} = -\frac{r'_x}{r_s} \quad \text{Eq. 20}$$

És important recordar que aquestes expressions cinètiques són empíriques i s'utilitzen per explicar i il·lustrar els fenòmens que es produeixen, però que no són les úniques que existeixen.

El factor fonamental en l'aplicació de qualsevol expressió cinètica és l'anàlisi d'un balanç de masses. És a dir, l'expressió utilitzada ha de descriure el fenomen observat.

6.3.2. Influència de la temperatura

La influència de la temperatura sobre les constants de velocitat de reacció biològics és molt important per tal d'assegurar l'eficàcia d'un procés de tractament biològic. A més d'influir en les activitats metabòliques de la població microbiana, també té efecte sobre altres factors com la velocitat de transferència de gasos i sobre les característiques de sedimentació dels sòlids biològics. De forma general, en els mesos d'hivern s'obté un rendiment més baix comparat amb els mesos d'estiu

Els intervals de temperatures als quals són capaços de viure els diversos grups d'organismes són un element de selecció de la fauna microbiana i per tant del consorci microbià que hi haurà en el sistema de fangs activats.

6.3.3. Influència del pH

El pH és un altre important característica ambiental que influeix en la presència de determinades espècies de microorganismes en els sistemes biològics de depuració d'aigües. Cada espècie pot viure entre uns marges més o menys definits de pH, a uns certs nivells d'àcids o alcalinitat, presentant una activitat òptima en un valor concret. El rang de pH òptim sol estar comprès entre 6 i 8, però els marges de treball poden estar entre 4,5 i 9,5.

6.3.4. Requeriments d'oxigen i nutrients

El procés de fangs activats requereix oxigen i nutrients per satisfer les necessitats dels microorganismes. En la majoria de situacions el donant d'electrons o la DBO actuen com a limitant de la taxa de reproducció i creixement dels microorganismes. Això vol dir que nutrients i acceptors d'electrons (en aquest cas l'oxigen) tenen concentracions molt per sobre de la seva concentració de saturació (K). Per l'oxigen dissolt, K és menor de 1 mg/L, i una concentració de 2 mg/L o major manté l'oxigen com a limitador de la taxa. No hi ha conclusions definitives sobre el valor de K per nutrients com nitrogen, fòsfor, ferro i altres constituents, però els valors semblen ser molt baixos, molt menors que 1 mg/L.

La taxa de consum d'oxigen és proporcional a la taxa d'utilització del substrat, La taxa de subministrament d'oxigen ha de ser la suficient com per satisfer la taxa de consum. La concentració d'oxigen dissolt s'ha de mantenir a prop dels nivells no limitadors.

La taxa de consum de nutrients és proporcional a la taxa neta de síntesi de biomassa. Els nutrients entren normalment en el sistema en l'aigua residual afluent. La concentració d'un nutrient en l'afluent necessita ser major que els requeriments estequiòmètrics per la síntesi neta de forma que la seva concentració no resulti limitadora de la taxa. Si un nutrient no està present en l'afluent a una concentració suficientment alta, ha de ser proporcionat amb la taxa lo bastant alta com per compensar la diferència.

El requeriment estequiomètric en nutrients és difícil de predir, ja que la investigació en aquests casos és limitada. Freqüentment, aquests nutrients estan presents en la majoria de les aigües residuals, però no sempre és el cas. Pot analitzar-se l'aigua residual per determinar si estan presents les concentracions claus d'alguns nutrients. L'aigua residual d'una cerveseria sol contenir suficients nutrients per permetre un bon creixement dels microorganismes.

6.4. Paràmetres de control del procés

Hi ha dos paràmetres operacionals han trobat una àmplia aplicació n el disseny i funcionament del sistema d'oxidació biològica: La relació aliment/microorganismes (F/M) i el temps de retenció de sòlids (θ_x).

6.4.1. Relació aliment-microorganismes

La relació aliments/microorganismes (F/M) es refereix a la massa d'aliment o residu orgànic i la massa de microorganismes o fang biològic. Representa la quantitat relativa de reactius (residu orgànic i fang biològic) escollits per ser combinats en les equacions de les reaccions bioquímiques.

El valor de F/M permet determinar la quantitat de fangs que es necessita tenir en el reactor. En tractament d'aigües residuals industrials es recomana treballar a baixa càrrega o càrrega convencional (Wang and Li 2009):

Referència	Temps cicle (h)	F/M (kg DBO ₅ / kg MLSS · d)	X (mg MLSS/L)
Baixa càrrega	4 – 48	0,05 – 0,1	4.000 – 6.000
Convencional	4 – 24	0,15 – 0,6	2.000 – 4.000

Taula 15. Recomanacions d'operació per a aigües residuals industrials. Font: (Wang and Li 2009)

Si el valor de F/M és massa baix significa que no hi ha suficient aliment per la biomassa, fa que el fang tingui pobres característiques de decantació (flòculs dispersos), en canvi si és massa alt, predominen microorganismes de naturalesa filamentosa que no sedimenten correctament com s'explica més endavant quan es parla dels problemes que afecten al procés de fangs activats.

6.4.2. Temps de retenció de sòlids

El temps de retenció de sòlids, o SRT (θ_x), s'utilitza freqüentment en sistemes de fangs activats no només per controlar el rendiment del sistema, sinó també per controlar les característiques físiques i biològiques del fang. El SRT vindria a ser el temps mig que viuen els microorganismes dins del sistema abans de ser retirats a través de la purga. En base a la teoria cinètica, un major θ_x hauria de proporcionar un major grau d'eliminació de substrat. Tot i això, un valor alt de θ_x pot causar problemes de sedimentació del fang, per això és important ajustar el SRT amb l'objectiu d'assolir el punt òptim de funcionament per les condicions de la planta de tractament.

El fang actiu és sistema ecològic complex en el que els consumidors primaris de substrat existeixen conjuntament amb organismes secundaris i depredadors que viuen dels organismes primaris. Funcionar a relativament llargs θ_x permet l'acumulació d'organismes de creixement lent que són expulsats del sistema si el SRT és curt.

Un valor de SRT adequat perquè el funcionament romangui estable amb flòculs compactes, ben sedimentats, per aconseguir un efluent net, normalment està comprès entre 4 i 10 dies (Arora et al. 2015).

A SRT llargs (superior a 10 dies), es creen organismes de creixement lent que poden causar problemes en la sedimentació, com el *bulking* i el *foaming*, fenòmens que es comenten més endavant.

6.5. Problemes que afecten al procés de fangs activats

Els problemes més freqüents en els processos de fangs activats són el fang voluminós (*bulking*), el fang ascendent i la escuma (*foaming*). És important estudiar la naturalesa i els possibles mètodes de control d'aquests fenòmens ja que són problemes molt comuns en les plantes de fangs activats.

Fang voluminós (*bulking*)

Un fang voluminós és aquell que posseeix pobres característiques de sedimentació i escassa compactabilitat. Se n'han identificat dos tipus: un és produït pel creixement de organismes filamentosos i l'altre és causat per l'aigua absorbida en el flocul, de forma que aquest s'infla, redueix la seva densitat i no sedimenta.

Les causes del *bulking* estan relacionades amb:

1. Les característiques físiques i químiques de l'aigua residual
2. Les deficiències del projecte de la planta

Entre les característiques de l'aigua residual que poden incidir en el *bulking* es troben les variacions de cabal i concentració, el pH, la temperatura, el grau de septicèmia, el contingut de nutrients i la naturalesa dels constituents.

Entre les deficiències del projecte de la planta s'inclouen les capacitats de subministrament d'aire, les insuficiències de la capacitat de bombeig i insuficient mescla. Les causes operacionals del *bulking* filamentós són baixes concentracions d'oxigen, falta de nutrients, variacions en la càrrega orgànica i baixes relacions aliment/microorganismes (F/M). Les causes operacionals del *bulking* no filamentós són càrregues orgàniques inadequades, excessiva aeració i presència de compostos tòxics.

Fang ascendent

En ocasions, és possible que un fang de bones característiques de sedimentació floti o ascendeixi cap a la superfície després d'un període curt de sedimentació. Aquest fenomen es produeix com a conseqüència de la desnitrificació, procés en el que els nitrats i nitrats de l'aigua residual es converteixen a nitrogen gas. Conforme es produeix el nitrogen, gran part d'aquest queda atrapat en el fang. Si es forma una quantitat suficient de gas, aquest fa que el fang floti cap a la superfície. Es pot diferenciar del *bulking* observant les petites bombolles de gas adherides als sòlids que floten.

Els problemes que provoca el fang ascendent es poden solucionar reduint el temps de retenció de sòlids o del fang.

Sent el temps de retenció del fang la relació entre la massa de microorganismes en el sistema i la producció neta de biomassa i el temps mig de retenció cel·lular la relació entre la massa de

microorganismes en el sistema i la entrada de biomassa, per síntesi i transport hidràulic amb l'alimentació.

Escumes (*foaming*)

En els sistemes de fangs activats, la formació d'una escuma viscosa, de color marró, que cobreix el reactor, provoca problemes de seguretat, efluent de baixa qualitat i males olors. La formació està associada a la presència d'un organisme filamentós de creixement lent normalment de la família *Nocardia*. Algunes de les possibles causes de la seva formació són:

1. Baixes relacions aliment/microorganismes (F/M)
2. Concentracions elevades de sòlids suspesos (biomassa)
3. Incorrecta aeració del fang

El mètode més utilitzat pel control del *foaming* és la reducció del temps de retenció del fang.

6.6. Objectius de depuració

La flexibilitat dels sistemes amb SBR permet nombroses modificacions de la duració del cicle i de les seves etapes, així com de les característiques d'agitació i aeració. Entre els objectius de depuració es poden mencionar principalment:

- Eliminació de carboni orgànic i MES
- Eliminació de carboni orgànic, MES i nitrificació
- Eliminació de carboni orgànic, MES i Nitrogen (nitrificació – desnitrificació)
- Eliminació de carboni orgànic, MES, Nitrogen i Fòsfor.

Per tractament d'aigües residuals d'una cerveseria només és necessari un tractament per l'eliminació de carboni orgànic i MES, però s'expliquen breument els altres objectius per explicar el significat dels diferents termes i deixar constància que és possible eliminar altres contaminants realitzant petits canvis en el procés operacional.

Nitrificació: És la conversió del nitrogen en forma amoniacal a nitrats i finalment a nitrats. La nitrificació es pot aconseguir durant les fases de reacció aeròbiques a més de ser necessari un temps de retenció cel·lular elevat per permetre el creixement d'organismes nitrificants.

Desnitrificació: És la conversió de nitrats a gas nitrogen. Es pot realitzar de dos formes: La primera és produint una fase anòxica d'emplenament durant la qual l'afluent actua com a font de carboni per la desnitrificació, la segona és creant una fase anòxica entre les fases de reacció aeròbica i la descàrrega de l'efluent.

Nitrificació – desnitrificació: Per augmentar el rendiment d'eliminació de nitrogen es poden inserir fases aeròbiques durant l'etapa anòxica d'emplenament.

Eliminació fòsfor: Si es sotmet un fang a condicions anaeròbiques i aeròbiques alternats s'aconsegueix desenvolupar una població de microorganismes acumuladors de fòsfor que són capaços d'eliminar fosfats de l'afluent.

S'ha de dir, que encara que l'objectiu de l'operació sigui eliminar carboni orgànic i MES, també s'observa una eliminació de nitrogen, i en alguns casos, de fòsfor.

6.7. Fangs de depuradora

Els contaminants inicialment presents en l'aigua passen als fangs, per tant és molt important que aquests fangs, que són molt més concentrats en contaminants, siguin gestionats correctament com s'ha explicat anteriorment en el capítol 4.

Els fangs purgats es caracteritzen per tenir un alt contingut en aigua que fan difícil la seva manipulació i disposició final. Hi ha una gran varietat de processos per al tractament de fangs, la tria d'un procés o d'un altre depèn de les característiques del fang, dels costos d'inversió però sobretot de la grandària i localització de la instal·lació.

Els fangs obtinguts del tractament de l'aigua d'una cerveseria, degut a que no conté metalls pesants ni altres contaminants perillosos és aplicable a fertilitzant o esmena en l'agricultura simplement secant els fangs al sol (Kanagachandran et al. 2006).

7. DISSENY D'UN SBR PER L'ELIMINACIÓ DE DBO

Els criteris de disseny, modelització i operació de sistemes de fangs activats varien des de criteris totalment empírics fins a criteris basats en principis sòlids. Normalment el disseny dels reactors es basen en els balanços de masses i la cinètica del sistema de reacció (Blasi 2006).

7.1. Variables i paràmetres de disseny

Abans de dissenyar i modelitzar és fonamental conèixer les variables i paràmetres de disseny que defineixen el procés de fangs activats per l'eliminació de DBO.

7.1.1. Característiques de l'afluent i l'efluent

Les composicions dels diferents corrents estan caracteritzades per dos tipus de concentracions:

Concentració de DBO soluble: Es simbolitza mitjançant el símbol **S**. El disseny de les plantes de fangs activats es basen en el consum de DBO soluble, que és el resultat del procés d'oxidació biològic que es du a terme en el reactor. La DBO és el substrat del que s'alimenten els microorganismes.

Concentració de sòlids volàtils en suspensió (VSS): Es simbolitza mitjançant el símbol **X**. Els VSS corresponen als fangs biològics, constituït per una població heterogènia de microorganismes. Els sòlids total en suspensió estan formats pels sòlids volàtils en suspensió més els sòlids no volàtils en suspensió.

$$SS = VSS + NVSS \quad \text{Eq. 21}$$

Quan es treballa en condicions de mescla completa en el reactor, els VSS corresponen als sòlids volàtils en suspensió en el licor mescla (MLVSS). Anàlogament, es té MLSS (sòlids en suspensió en el licor mescla) i MLNVSS (sòlids no volàtils en suspensió en el licor mescla). Per tant:

$$MLSS = MLVSS + MLNVSS \quad \text{Eq. 22}$$

Les característiques de tractabilitat de l'afluent venen descrites pels coeficients cinètics μ_m , K_s , k_d i Y , conjuntament amb la relació DBO_5/DQO que dona una idea de la biodegradabilitat de la matèria orgànica present en l'afluent.

7.1.2. Cinètica del reactor. Balanç de masses

Per realitzar el balanç de masses en el reactor es consideren algunes unes hipòtesis:

- La reacció es realitza a volum constant

- El reactor és de mescla completa

El balanç de masses per un constituent C es descriu com:

$$\text{Acumulació} = \text{Entrada} - \text{Sortida} + \text{Generació}$$

$$\frac{dC}{dt} V = QC_0 - QC + r_c V \quad \text{Eq. 23}$$

On:

$\frac{dC}{dt}$ = velocitat de variació de la concentració del constituent C dins del reactor

V = Volum del reactor

Q = cabal que entra i surt del reactor

C_0 = Concentració del constituent C a l'entrada del reactor

C = Concentració del constituent C a la sortida del reactor

r_c = Velocitat intensiva referida al constituent C de la reacció

Per un reactor discontinu, Eq. 23 es pot simplificar, ja que durant la reacció no entra ni surt cap corrent del reactor ($Q = 0$). Per tant, queda:

$$\frac{dC}{dt} = r_c \quad \text{Eq. 24}$$

Utilitzant les equacions cinètiques de creixement bacterià aeròbic descrites anteriorment (Eq. 18 i Eq. 19 Eq. 14), els balanços de masses per la biomassa i pel substrat en un reactor discontinu poden ser escrits com:

$$r_x' = \frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{SX}{K_s + S} - k_d X \quad \text{Eq. 25}$$

$$r_s = \frac{dS}{dt} = -k_m \frac{SX}{K_s + S} \quad \text{Eq. 26}$$

On:

r_x' = taxa de creixement bacterià

r_s = taxa d'utilització de substrat

Cal dir, que tot i que s'ha considerat la hipòtesi de volum constant, un SBR no opera a volum constant durant l'etapa d'emplenament, la qual és una porció significant del temps del cicle. Durant aquesta etapa, les reaccions que tenen lloc en el reactor es donen des del volum inicial fins al volum final del reactor.

$$V = V_0 + Qt_F \quad \text{Eq. 27}$$

On:

V_0 = volum inicial del reactor

t_F = temps de la fase d'emplenament

Per conseqüència, el balanç de masses que descriuen el creixement microbià i l'eliminació de substrat durant l'etapa d' emplenament no poden ser els mateixos que en un reactor discontinu perfectament agitat a volum constant, però si que es considera com a tal.

7.1.3. Determinació dels coeficients cinètics

Per poder utilitzar els models cinètics descrits anteriorment, és necessari disposar dels valors dels paràmetres μ_m , K_s , k_d i Y . Per determinar aquests valors es sol utilitzar reactors a escala laboratori o escala pilot.

Per la realització d'aquest projecte, s'han estimat aquest valors a partir d'estudis realitzats anteriorment pel tractament d'aigües residuals d'altres cerveseries utilitzant SBR a escala laboratori (Ling and Lo 2015) com també una revisió crítica sobre el tractament d'aigües residuals de les cerveseries (Vriens et al. 1990)

7.1.4. Taxa específica d'eliminació de substrat, temps de retenció hidràulic, temps mig de retenció cel·lular i edat del fang

Per tal de comprendre millor els conceptes de taxa específica d'eliminació de substrat, temps mig de retenció cel·lular, temps de retenció del fang (o edat del fang), biomassa produïda, producció de fangs i requeriment d'oxigen, es defineixen seguint un balanç de masses en un reactor continu de tanc agitat (RCTA) per ser el cas més simple (Figura 24). Més endavant, al modelitzar el SBR aquestes definicions seran adaptades segons el model de disseny utilitzat.

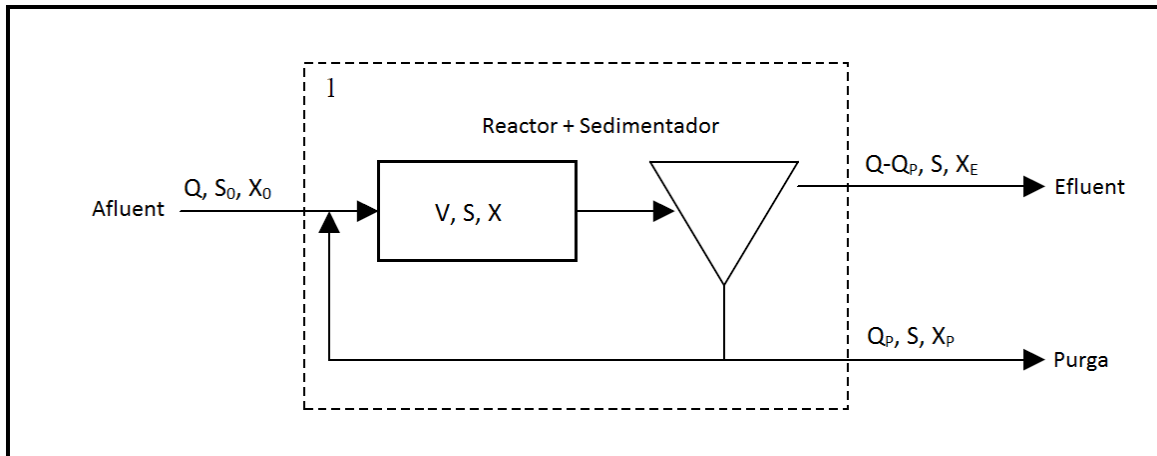


Figura 24. Representació esquemàtica d'un reactor RCTA

Es parteix de les següents hipòtesis:

- Totes les reaccions ocorren a l'interior del reactor (no en les canonades).
- El reactor està completament mesclat i la reacció és a volum constant.
- L'afluent no conté biomassa ($X_0 \approx 0$)
- La sedimentació és completa, és a dir, l'efluent no conté biomassa ($X_E \approx 0$)
- Predomina l'estat estacionari ($\frac{dX}{dt} = 0$, $\frac{dS}{dt} = 0$)

El balanç de masses per la biomassa i pel substrat al voltant de la secció 1 és:

$$V \frac{dX}{dt} = 0 = 0 - 0 - Q_p X_p + V r_x \quad \text{Eq. 28}$$

$$V \frac{dS}{dt} = 0 = Q S_0 - Q S + V r_s \quad \text{Eq. 29}$$

Tenint en compte que la taxa de creixement bacterià i la taxa d'utilització del substrat són:

$$r_x = \mu X - k_d X \quad \text{Eq. 30}$$

$$r_s = -q X = -\frac{\mu}{Y} X \quad \text{Eq. 31}$$

On:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S} \quad \text{Eq. 32}$$

i

$$q = \frac{\mu_m}{Y} \frac{S}{K_s + S} \quad \text{Eq. 33}$$

La taxa específica d'eliminació de substrat (q) és la massa eliminada de substrat de l'afluent per unitat de microorganismes per unitat de temps [$m(\text{DBO}_5)/m(\text{VSS}) \cdot t$]. Combinant les Eq. 29 i Eq. 31:

$$q = \frac{Q(S_0 - S)}{VX} \quad \text{Eq. 34}$$

El balanç de masses dels microorganismes (Eq. 28) es pot reescriure utilitzant la definició de l'Eq. 30:

$$VX(\mu - k_d) = Q_P X_P \quad \text{Eq. 35}$$

El temps mig de retenció hidràulic ($\text{TRH} = \theta$) és el temps que l'aigua tractada està dins del reactor:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad \text{Eq. 36}$$

Com ja s'ha dit anteriorment:

Temps mig de retenció cel·lular (θ_x) és la relació entre la massa de VSS en el sistema i la entrada de VSS en el mateix, per síntesi de biomassa i transport hidràulic amb l'afluent.

Edat del fang (θ_c) és la relació de la massa de VSS en el sistema i la producció neta de biomassa.

Si es consideren condicions estacionàries, tota la biomassa produïda pel sistema serà eliminada per la purga i l'efluent. A més, si es suposa que la quantitat de microorganismes en l'afluent i l'efluent i la pèrdua endògena són menyspreables, el temps de retenció cel·lular i l'edat del fang són equiparables:

$$\theta_x = \theta_c = \frac{VX}{Q_P X_P} \quad \text{Eq. 37}$$

Com s'ha dit, en condicions estacionàries, tota la biomassa produïda pel sistema serà eliminada per la purga:

$$P_x = Q_P X_P \quad \text{Eq. 38}$$

On:

P_x = Quantitat de biomassa produïda i purgada del sistema

Per tant, si es purga una fracció de biomassa periòdicament, es pot fixar el temps de retenció cel·lular o l'edat del fang.

Combinant les Eq. 35, Eq. 37 i Eq. 38 es pot relacionar l'edat del fang amb la taxa neta de creixement específic:

$$\frac{1}{\theta_x} = \mu - k_d \quad \text{Eq. 39}$$

Per tant la taxa de creixement específic és:

$$\mu = \frac{1}{\theta_x} + k_d = \frac{1 + k_d \theta_x}{\theta_x} \quad \text{Eq. 40}$$

7.1.5. Biomassa del reactor

La quantitat de biomassa que pot ser retinguda en el reactor (M_x), es pot definir combinant les Eq. 29, Eq. 31 i Eq. 40, i aïllant VX :

$$M_x = VX = \frac{YQ(S_0 - S)}{(1 + k_d \theta_x)} \theta_x \quad \text{Eq. 41}$$

També pot ser expressada en termes de producció observada, combinant les equacions Eq. 20, Eq. 25 i Eq. 31 es dedueix que:

$$Y_{obs} = -\frac{r'_x}{r_s} = \frac{(\mu - k_d)X}{\frac{\mu}{Y}X} = \frac{Y(\mu - k_d)}{\mu} \quad \text{Eq. 42}$$

Utilitzant l'Eq. 39 en el numerador i l'Eq. 40 en el denominador de l'Eq. 42, la producció observada es pot escriure com:

$$Y_{obs} = \frac{Y \frac{1}{\theta_x}}{\frac{(1 + k_d \theta_x)}{\theta_x}} = \frac{Y}{1 + k_d \theta_x} \quad \text{Eq. 43}$$

Per tant:

$$M_x = VX = \frac{YQ(S_0 - S)}{(1 + k_d \theta_x)} \theta_x = Y_{obs} Q(S_0 - S) \theta_x \quad \text{Eq. 44}$$

7.1.6. Criteris de càrrega

Pel control dels processos de fangs activats, s'han proposat una sèrie de paràmetres empírics i racionals, dos dels paràmetres més utilitzats són: la relació aliments/microorganismes (F/M) i el temps de retenció cel·lular (θ_x).

La relació aliment/microorganismes (F/M) es defineix com:

$$F/M = \frac{S_0}{\theta X} \quad \text{Eq. 45}$$

On:

F/M = relació aliment/microorganismes (d⁻¹)

S₀ = concentració de DBO en l'afluent (kg/m³)

θ = Temps de retenció hidràulic (d)

Q = cabal afluent (m³/d)

X = concentració de SSV en el reactor (kg/m³)

La relació entre la taxa d'utilització específica (q) i la relació aliment/microorganismes (F/M) és:

$$q = F/M \cdot E \quad \text{Eq. 46}$$

On:

E = eficiència o rendiment del procés (%)

$$E = \frac{(S_0 - S)}{S_0} 100 \quad \text{Eq. 47}$$

A partir de les Eq. 45, Eq. 46 i Eq. 47, s'obté que la taxa d'utilització específica es pot escriure com:

$$q = \frac{S_0 - S}{\theta X} \quad \text{Eq. 48}$$

Així doncs, q (F/M multiplicada pel rendiment) es pot considerar com una mesura del grau d'utilització del substrat per unitat de massa de microorganismes i θ_x es pot considerar com una mesura del temps mig de residència dels microorganismes dins del sistema. La relació entre q, F/M i θ_x és:

$$\frac{1}{\theta_c} = Y \cdot F/M \cdot E - k_d = Yq - k_d \quad \text{Eq. 49}$$

On:

Y = Coeficient de producció cel·lular (kg cèl·lules produïdes/kg matèria orgànica eliminada)

7.1.7. Producció de fangs

El coneixement de la producció diària de fangs (P_x) és important ja que afecta el disseny del reactor i evacuació del fangs que s'han de purgar. Combinant les Eq. 37 i Eq. 38, s'obté:

$$P_x = \frac{VX}{\theta_x} \quad \text{Eq. 50}$$

Sabent que la massa que pot ser retinguda en el reactor (M_x) és igual VX i aplicant l'Eq. 44 a l'Eq. 50, la quantitat de biomassa purgada diàriament també es pot definir com:

$$P_x = Y_{obs}Q(S_0 - S) \quad \text{Eq. 51}$$

7.1.8. Requeriments d'oxigen

La necessitat teòrica d'oxigen que s'ha de subministrar al sistema es pot determinar a partir de la DBO de l'aigua residual. El raonament utilitzat és el següent:

Si se sap la quantitat d'oxigen necessari per oxidar una massa determinada de DBO, la demanda teòrica d'oxigen per l'eliminació de la matèria orgànica present en l'aigua residual es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$R_{O_2} = K \cdot Y_{O_2} \quad \text{Eq. 52}$$

On:

R_{O_2} = requeriment teòric d'oxigen (kg O_2 /d)

K = massa de matèria orgànica a tractar (kg DBO_5 /d)

Y_{O_2} = Quantitat d'oxigen necessari per oxidar una massa donada de DBO_5 (g O_2 /g DBO_5)

El coeficient Y_{O_2} per l'oxidació de les parets cel·lulars dels microorganismes és de 1,42 g O_2 /g DBO_5 , a aquest oxigen requerit se li ha d'afegir l'oxigen consumit per la presència de nitrogen orgànic i per altres factors, de manera que el factor hauria de ser un valor una mica superior. S'utilitza un valor de Y_{O_2} de 2 g O_2 /g DBO_5 per a la realització dels càlculs.

A partir del requeriment d'oxigen teòric diari es pot passar a requeriment d'aire teòric diari s'utilitzen els pesos moleculars de l'oxigen i de l'aire (32 i 29, respectivament) i la fracció d'oxigen present en l'aire (21%):

$$R_{aire} = R_{O_2} \frac{M_{aire}}{M_{O_2}} \frac{100}{21} \quad \text{Eq. 53}$$

A partir del requeriment d'aire diari es pot calcular el cabal d'aire teòric diari que es necessita utilitzant la densitat de l'aire:

$$Q_{aire} = \frac{R_{aire}}{\rho_{aire}} \quad Eq. 54$$

7.1.9. Propietats de sedimentació

Les característiques de sedimentació s'avaluen mitjançant assaigs de sedimentació realitzats en el laboratori. Normalment s'avaluen 2 paràmetres:

1. Velocitat de sedimentació per zones: És la velocitat a la qual les partícules en suspensió sedimenten abans d'assolir la concentració crítica. Un fang amb bones característiques de sedimentació presenta una velocitat de sedimentació d'aproximadament 6 m/h.
2. Sludge volumètric index (SVI): O índex volumètric del fang, es defineix com els ml ocupats per 1 g de sòlids en suspensió del licor mescla (MLSS) després de sedimentar 30 minuts en una proveta de 1000 mL.

La concentració de sòlids totals en suspensió després de la sedimentació en el reactor, a partir d'ara representada com X_R , es pot estimar suposant que no hi ha sòlids en suspensió perduts en l'efluent i que la concentració de fangs és equivalent a la que s'assoleix després de 30 minuts de sedimentació en la proveta de laboratori, així que:

$$X_R \approx \frac{1}{SVI} \frac{g}{ml} \quad \text{o} \quad \frac{10^6}{SVI} \text{ mg/l} \quad Eq. 55$$

Els valors típics per llots de bones característiques de sedimentació estan compresos entre 50 i 150 ml/g.

7.2. Mètode de disseny de Orhon

Es dissenya el reactor a partir del mètode de disseny proposat per Orhon i Artan (Orhon and Artan 1994). Els sistemes SBR es caracteritzen per ser un sistema que funciona per cicles, com s'ha descrit anteriorment. Aquest cicle està compost per diferents etapes, cadascuna ocupant un temps determinat dins del cicle:

$$T_C = T_F + T_R + T_S + T_W + T_I \quad Eq. 56$$

On:

T_C = Temps del cicle

T_F = Temps d'emplenament

T_R = Temps de reacció

T_S = Temps sedimentació

T_W = Temps de descàrrega

T_I = Temps d'inactivitat

El temps d'emplenament (T_F) és una part important dins del cicle, en la qual el volum del reactor va des de V_0 fins a V_T , en la Figura 25 s'il·lustra un esquemàticament un SBR.

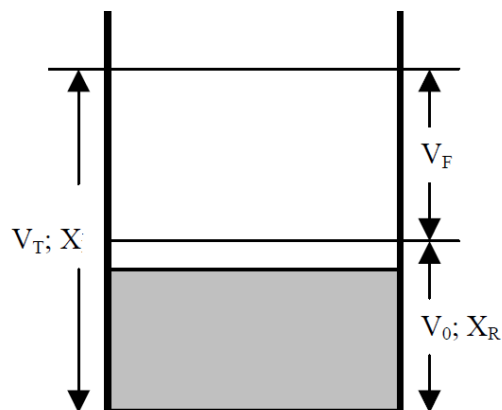


Figura 25. Esquema d'un SBR

Selecciónant el nombre de cicles al dia (m) es pot dir que:

$$Q = N_C V_F \quad \text{Eq. 57}$$

i

$$T_C = \frac{1}{N_C} \quad \text{Eq. 58}$$

Per una operació cíclica, la taxa específica d'eliminació de substrat és:

$$q = \frac{V_F N_C (S_0 - S)}{V_T X} = \left(1 - \frac{V_0}{V_T}\right) \frac{N_C (S_0 - S)}{X} \quad \text{Eq. 59}$$

A partir de les Eq. 29, Eq. 39 i Eq. 42 es dedueix que:

$$\frac{1}{\theta_x} = Y_{obs} q \quad \text{Eq. 60}$$

Per tant, a partir de les Eq. 59 i Eq. 60:

$$\theta_x = \frac{V_T X}{V_F N_C Y_{obs} (S_0 - S)} \quad \text{Eq. 61}$$

A partir d'aquesta expressió es pot conèixer la biomassa que pot ser mantinguda pel reactor per un substrat donat:

$$M_x = V_T X = V_F N_C Y_{obs} (S_0 - S) \theta_x \quad \text{Eq. 62}$$

O bé

$$T_C = \frac{V_F Y_{obs} (S_0 - S)}{V_T X} \theta_x \quad \text{Eq. 63}$$

Es defineix el temps d'activitat (T_A), com el temps on es donen les reaccions bioquímiques:

$$T_A = T_F + T_R = T_C - (T_S - T_W - T_I) \quad \text{Eq. 64}$$

Conseqüentment, l'edat efectiva del fang (θ_x^E) esdevé:

$$\theta_x^E = \frac{T_A}{T_C} \theta_x \quad \text{Eq. 65}$$

La relació entre T_A i θ_x^E s'obté combinant les

$$T_A = \left(1 - \frac{V_0}{V_T}\right) \frac{Y_{obs} (S_0 - S)}{X} \theta_x^E \quad \text{Eq. 66}$$

És possible instal·lar més d'un reactor en paral·lel, això és necessari si es rep un flux continu de cabal i no es disposa d'un tanc homogeneïtzador. Per n reactors, el temps necessari d'emplenament esdevé:

$$T_F = \frac{T_C}{n} = \frac{1}{N_C \cdot n} \quad \text{Eq. 67}$$

i

$$T_R = T_A - T_F \quad \text{Eq. 68}$$

Per cada reactor, el volum d'emplenament (V_{Fn}) i el volum total (V_{Tn}) venen definits per:

$$V_{Fn} = \frac{V_F}{n} = QT_F \quad \text{Eq. 69}$$

$$V_{Tn} = \frac{V_{Fn}}{\left(1 - \frac{V_0}{V_T}\right)} = \frac{QT_F}{\left(1 - \frac{V_0}{V_T}\right)} \quad \text{Eq. 70}$$

7.2.1. Procediment de disseny de Orhon

El procediment que es segueix segons el mètode de disseny d'Orhon és el següent:

1. Seleccionar θ_x (temps mig de residència dels sòlids o edat del fang) adequat per l'eliminació de la DBO en l'afluent.
2. Calcular Y_{obs} (producció observada, quantitat de biomassa formada per unitat de matèria orgànica eliminada) i P_x (producció de sòlids en suspensió per dia).
3. Seleccionar N_c (nombre cicles per dia). Per calcular T_c (temps del cicle). Aquesta selecció haurà de ser justificada amb la concentració de MLVSS calculada.
4. Càlcul de M_x (producció màssica de sòlids en suspensió).
5. Càlcul de X_R (densitat dels sòlids en suspensió).
6. Càlcul de V_0 (volum de fangs en el reactor). Se li aplica un factor de seguretat de 1,1.
7. Càlcul de V_T (volum total).
8. Càlcul de X (densitat mitja dels sòlids en suspensió). Aquest valor ha d'estar dins un rang apropiat. Si no és el cas, s'ha d'ajustar el θ_x o T_c .
9. Seleccionar n (nombre de reactors).
10. Calcular el volum de cada reactor.
11. Calcular l'àrea i la altura del reactor.

Els paràmetres de disseny que permeten modelar el sistema són:

- Q = Cabal de l'afluent a tractar (m^3/d)
- S_0 = Càrrega orgànica de l'afluent a tractar ($mg\ DBO_5/L$)
- Y = coeficient de conversió del substrat a cèl·lules del reactor ($mg\ VSS/mg\ DBO_5$)
- k_d = constant cinètica de pèrdua d'activitat cel·lular (d^{-1})
- SVI = índex volumètric de fangs, índex de volum mig de les cèl·lules del fang actius o sòlids en suspensió ($mg\ SS/L$)
- VSS/SS = relació entre els sòlids volàtils en suspensió i sòlids suspesos o també, la relació entre les partícules que poden acabar atrapades en els flòculs de fang activat i la concentració de biomassa)
- FS = factor de seguretat
- T_w = temps de descàrrega del reactor (h)
- T_s = temps de sedimentació (h)
- T_i = temps d'inactivitat (h)
- H_0 = altura mínima dels fangs en el reactor o altura de descàrrega del reactor (m)

S'ha dissenyat una eina en full de càlcul per observar com afecten les variables i paràmetres al volum del reactor. Aquesta eina pot ser molt útil quan el reactor estigui en funcionament i es puguin agafar dades dels paràmetres del procés i poder calcular les variables perquè el reactor funcioni correctament.

8. DISSENY DE L'EDAR

Per realitzar el disseny de l'estació de depuració d'aigües residuals per una micro-cerveseria s'han utilitzat dades extretes d'una cerveseria situada en la comarca del Ripollès. Una característica important que s'ha tingut en compte és la temperatura en els mesos d'hivern, sobretot per les nits, pot ser inferior a 0°C.

Abans de poder dissenyar el sistema és necessari saber la quantitat d'aigua residual que produeix la cerveseria i la concentració de contaminants que conté. Primer de tot s'ha mirat la quantitat d'aigua residual que es produeix en una producció i en quina part del procés és produïda, a partir d'això s'ha estimat la concentració de contaminants que conté. S'ha tingut en compte si aquesta aigua es produeix el mateix dia de la producció o en altres dies en cas que l'aigua s'ha utilitzat per la neteja dels equips o per altres finalitats. També s'ha mesurat el temps en què aquesta aigua és descarregada per saber el cabal màxim d'aigua residual que es produeix. La producció per un lot de 1200 L de cervesa es representa en la Taula 16. Cal destacar que la majoria de l'aigua és utilitzada pel refredament del most, part d'aquesta aigua és emmagatzemada en la caldera per ser reutilitzada al mateix dia per esbandir els tancs utilitats durant la producció, però la resta és descarregada directament. Aquesta aigua es pot considerar nul·la de contaminants ja que prové directament de la xarxa, fent disminuir considerablement la concentració final de l'aigua residual. La relació aigua residual/cervesa produïda és d'aproximadament 7 l aigua/l cervesa.

Processos	Volum (L)	Temps (min)	Cabal (L/min)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)
Dia de producció					
Desinfectar mànegues i fermentador amb paracetic	100	10	10	0	0
Esbandir macerador i terra (cas doble maceració)	200	5	40	4.000	2.800
Aigua sobrant del bescanviador	2.600	30	87	0	0
Aigua emmagatzemada del bescanviador i utilitzada per neteja	2.400	45	53	3.000	2.100
Aigua addicional pel rentat	500	30	17	3.000	2.100
Total	5.800			1.638	1.147
Dies diferents del de producció					
Rentat tanc fermentació	600	20	30	3.000	2.100
Rentat tanc maduració	600	20	30	3.000	2.100
Macerador	300	10	30	1.000	700
Olla cocció	300	10	30	1.000	700
Bescanviador	300	15	20	1.000	700
Mànegues	200	10	20	1.000	700
Terra	100	5	20	3.000	2.100
Embotelladora	200	15	13	2.000	1.400
Altres	100	-	-	3.000	2.100
Total	2.700			2.111	1.478
TOTAL	8.500	-	-	1.788	1.252

Taula 16. Producció d'aigua residual per un lot de 1.200L de cervesa.

La cerveseria produeix dos lots de cervesa cada setmana, és a dir, es produeixen 17.000 L d'aigua residual per setmana. Obtenint un cabal mitjà diari de 2.428 L/dia, aquest serà el cabal que haurà de tractar el sistema de tractament de l'aigua residual.

Els dies de producció no sempre són els mateixos, però mai es produeixen dos lots de cervesa en dies consecutius. Per calcular l'aigua produïda i acumulada durant tota la setmana s'ha partit del cas més desfavorable, és a dir, que es produeixen dos lots amb un dia entremig dels dos (Figura 26).

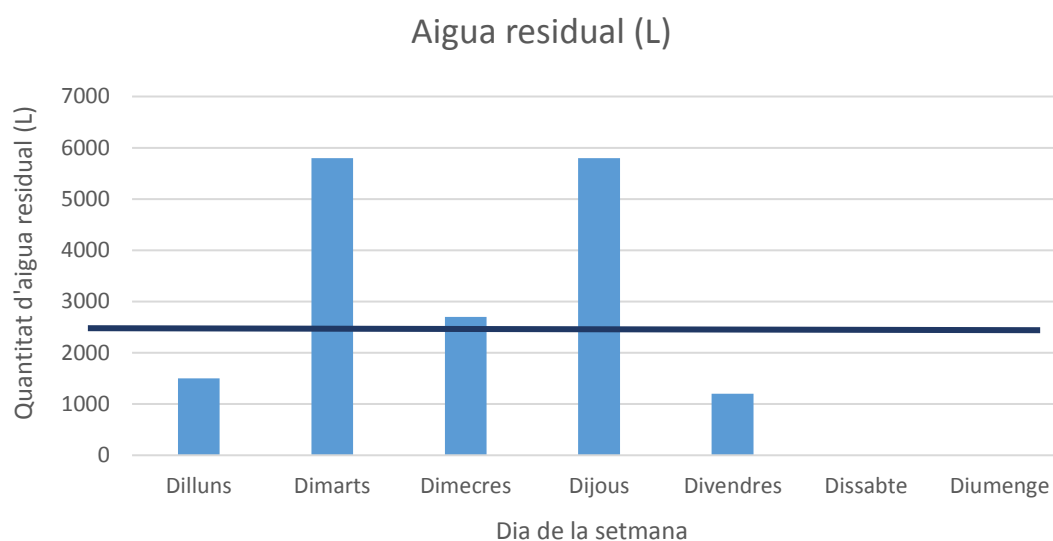


Figura 26. Producció diària d'aigua residual i aigua residual mitja produïda per dia.

També s'ha comparat l'aigua produïda cada dia de la setmana, l'aigua tractada en el sistema i l'aigua que no s'ha pogut tractar i per tant s'haurà d'emmagatzemar per ser tractada més endavant (Taula 17). Així s'observa que com a màxim s'acumulen 8.514 L d'aigua residual, el tanc homogeneïtzador haurà de tenir com a mínim aquest volum.

Setmana 1

	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
Aigua residual (L)	1500	5800	2700	5800	1200	0	0
Aigua mitja tractada (L)	0	2429	2429	2429	2429	2429	2429
Aigua acumulada (L)	1500	4871	5143	8514	7286	4857	2429

Setmana 2

	Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres	Dissabte	Diumenge
Aigua residual (L)	1500	5800	2700	5800	1200	0	0
Aigua mitja tractada (L)	2429	2429	2429	2429	2429	2429	2429
Aigua acumulada (L)	1500	4871	5143	8514	7286	4857	2429

Taula 17. Aigua residual produïda, tractada i acumulada setmanalment.

8.1. Descripció de la planta

El sistema (Figura 27) està format per una arqueta de a la zona de producció per recollir les aigües residuals provenint del procés, des d'on s'elevaven cap a un tamís estàtic a l'exterior de la fàbrica mitjançant una bomba submergible en l'arqueta. Els sòlids eliminats en el tamís es recullen en un tanc situat a sota del mateix, és per això que el tamís s'haurà d'elevat per sobre d'aquest tanc mitjançant una estructura. Una vegada l'aigua passa a través del tamís per remoure els sòlids més grans, l'aigua és transportada a un tanc homogeneïtzador, a través de la força de la gravetat. El tanc homogeneïtzador consta d'un sistema d'aeració amb difusors de bombolla fina per aconseguir la mescla de les diferents aigües residuals i començar el procés d'oxidació biològica que es completarà dins del reactor, també disposarà d'un sensor de pH, connectat a unes bombes dosificadoras que regulen automàticament el pH dins del tanc. L'aigua és transportada del tanc homogeneïtzador cap al reactor biològic mitjançant una segona bomba submergible, controlada per un altre temporitzador. El reactor incorpora també d'un sistema de difusors de bombolla fina controlat pel mateix compressor que el tanc homogeneïtzador, a més s'instal·la un agitador per millorar la dispersió de l'oxigen en l'aigua i subministrar mescla en el reactor quan sigui necessari. En el reactor s'instal·la un sensor de concentració d'oxigen dissolt en el tanc, connectat al compressor per mantenir un nivell adequat d'oxigen en tot moment. La descàrrega de l'efluent es realitza mitjançant una bomba submergible en el reactor d'altura ajustable, l'altura a la que s'ha de submergir la bomba és una mica per sobre de la separació entre fangs i aigua i es pot regular manualment des de la part superior del dipòsit, aquesta bomba també es controla amb un temporitzador i l'aigua és portada fins a l'arqueta de registre des d'on és descarregat cap al sistema de clavegueram. Per la purga dels fangs, s'utilitza una bomba al fons del reactor, també controlada per un temporitzador, des d'on els fangs són bombejats cap a un dipòsit on són emmagatzemats. Totes les bombes, excepte la bomba de purga dels fangs incorporen un flotador de seguretat per vessaments.

La automatització del procés el realitza utilitzant temporitzadors a les 3 bombes que controlen la càrrega, descàrrega de l'efluent i descàrrega de fangs, a més d'incorporar un temporitzador al compressor d'aire i al motor de l'agitador per poder controlar l'etapa de sedimentació. També s'utilitzen els sensors de pH i O₂ per ajustar automàticament aquestes variables en el procés i els sensors de nivells que incorporen les bombes proporcionen la seguretat del procés en cas de sobrecàrrega.

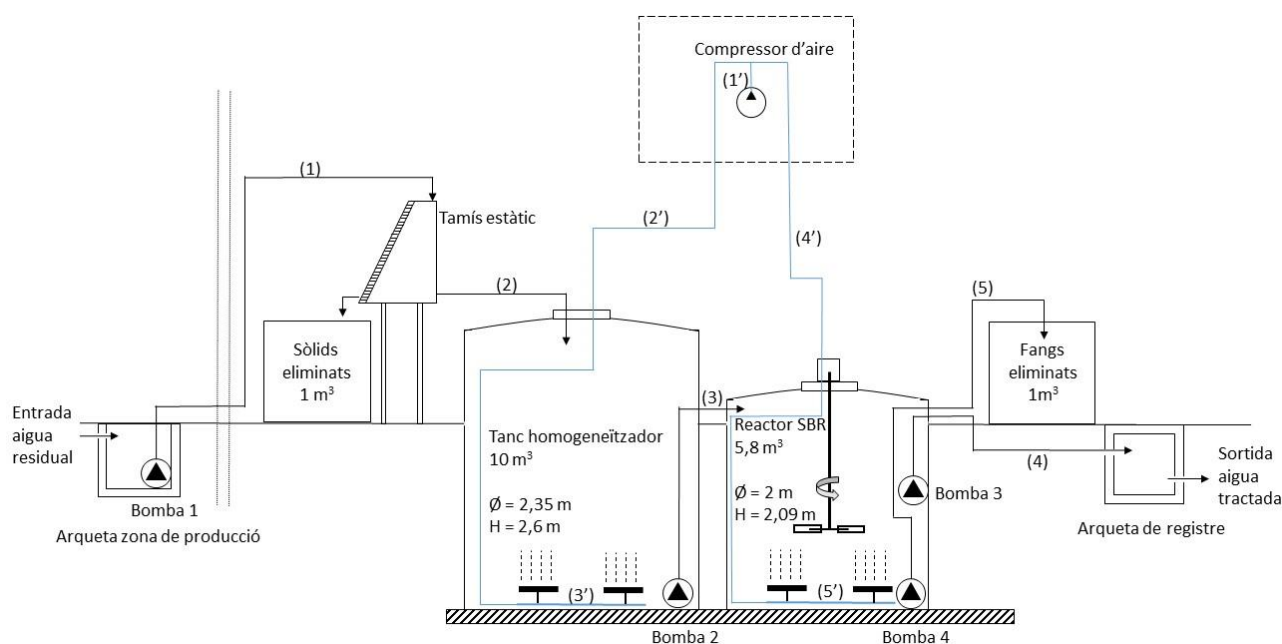


Figura 27. Representació esquemàtica de l'EDAR.

Tots els càlculs realitzats i les fitxes tècniques dels diferents equips que formen el sistema es poden trobar en els annexos.

8.2. Arquetes

S'ha decidit posar una arqueta a l'inici i al final del sistema, construïdes de formigó i enterrades. La primera té la utilitat d'emmagatzemar les aigües del procés perquè puguin ser bombejades cap al sistema de tractament i l'arqueta al final, segons el decret 130/2003, de 13 de maig, s'ha de construir perquè es puguin agafar mostres per realitzar els controls mediambientals de l'aigua residual. Les mides de l'arqueta de registre ha de ser de 60 x 60 x 60 cm.

La primera arqueta també es decideix d'instal·lar-se amb les mateixes mides i també es podrà aprofitar per prendre mostres i tenir un major coneixement de les característiques de l'aigua residual del procés sempre que es vulgui.

8.3. Tamís

S'ha decidit posar un tamís estàtic (Figura 28) per ser molt més econòmic que els tamisos rotatoris, tant d'adquisició com d'operació, ja que no tenen un motor que gasta energia. A més, segons el fabricant, per a aigües residuals en les que no hi grasses (com la d'una cerveseria) s'obtenen sòlids més secs que amb un rotatori. Aquest tamís, tot i que la majoria de sòlids cauen automàticament per la força de gravetat

s'haurà de controlar periòdicament que el tamís no estigui taponat. El funcionament del tamís s'il·lustra a la Figura 29.

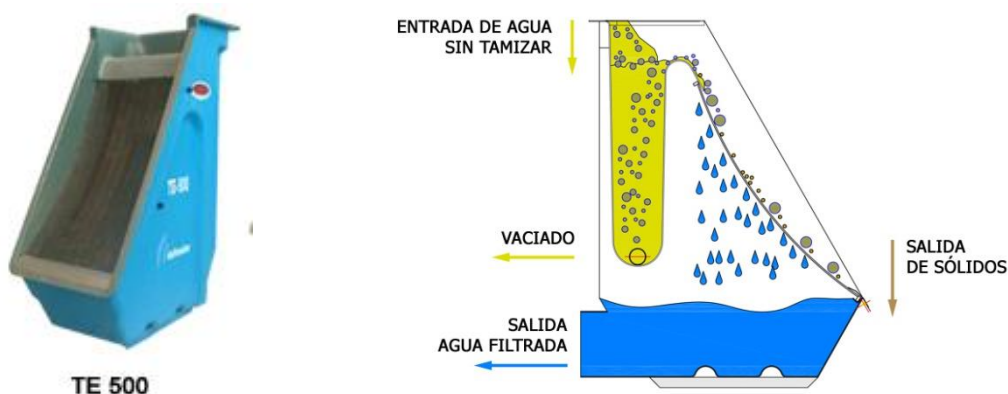


Figura 28. Tamís estàtic. Font: www.toroequipment.com

Figura 29. Representació esquemàtica del funcionament del tamís estàtic. Font: www.toroequipment.com

Es selecciona un tamís, amb un pas de llum de 2 mm. D'aquesta forma poden ser eliminats la majoria dels sòlids grans com els restos de gra que puguin causar problemes més endavant en el procés. Aquests sòlids eliminats del procés es dipositen en un dipòsit situat a sota del tamís, per on són eliminats els sòlids. El tamís haurà d'estar elevat per sobre d'aquest tanc mitjançant una estructura, semblant al de la Figura 30 però d'una altura d'1,2 metres.



Figura 30. Estructura per elevar el tamís. Font: www.toroequipment.com

8.4. Dipòsits

Tant el tanc homogeneïtzador com el reactor biològic s'elegeixen dipòsits de fibra de vidre (Figura 31), pel baix cost i fàcil instal·lació. S'utilitzen tancs enterrats, d'aquesta forma s'eviten problemes com que es creïn capes de gel en els mesos més freds de l'hivern. Perquè es puguin enterrar, s'ha de cavar un forat i construir una llosa de formigó al fons, a sobre del qual es situen els dipòsits.

Tanc homogeneïtzador: ha de ser suficientment gran per poder emmagatzemar tota l'aigua acumulada durant els dies de la setmana que no s'han pogut tractar, es selecciona un dipòsit vertical amb base plana de 10 m^3 , amb un diàmetre de 2,35 m i una altura de 2,6 m. En aquest tanc se li ha d'afegir una sortida de canonada per descarregar l'aigua cap al reactor.

Reactor: El volum calculat pel reactor és de $5,8 \text{ m}^3$. Un dipòsit de fibra de vidre de $5,8 \text{ m}^3$ té un diàmetre de 2 m i una altura de 2,09 m (mides exteriors). Amb aquest volum és suficientment gran com per poder tractar l'aigua residual durant les diferents èpoques de l'any. En aquest tanc se li han d'afegir dos forats per omplir i descarregar l'aigua, a més d'una obertura a la part superior per poder regular la profunditat de la bomba de descàrrega de l'efluent.



Figura 31. Dipòsit per ser enterrat de fibra de vidre. Font: www.tadipol.com

També són necessaris tancs per recollir els sòlids que s'extreuen de l'aigua en el tamís i per emmagatzemar els fangs extrets del reactor biològic. S'utilitzen tancs d'IBC (Figura 32) de 1000 L de capacitat, s'opta per posar 4 tancs, dos en cada punt, perquè sempre hi hagi un tanc en disposició quan l'altre és ple i els residus són portats per ser reutilitzats per una altre empresa.



Figura 32. Dipòsit IBC. Font: www.bauhaus.es

8.5. Sistema d'aeració

El sistema d'aeració està format per un compressor d'aire i un sistema de difusors de bombolla fina, els més utilitzats en sistemes de fangs activats, per dispersar el màxim l'aire pel volum del reactor aconseguint una millor eficiència de difusió de l'aire en l'aigua.

El nombre de difusors que s'han d'instal·lar depèn del caudal d'oxigen que s'ha de subministrar, que s'ha calculat de 5,2 m³/h d'aire en el reactor. Es suposa el mateix requeriment d'oxigen en el tanc homogeneïtzador.

El cabal màxim de cada difusor és de 8 m³/h, però es recomana un cabal el mínim possible, però superior a 2-2,5 m³/h. En cada tanc s'instal·len 2 difusors de discs de bombolla fina amb un diàmetre de 33 cm com s'il·lustra de forma esquemàtica en la Figura 33. D'aquesta forma passa al voltant de 2,6 m³/h per cada difusor.

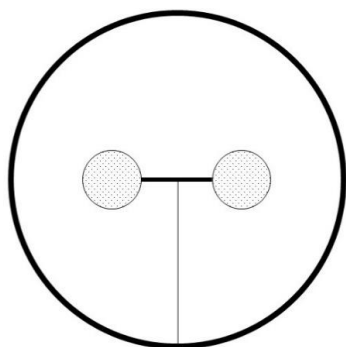


Figura 33. Distribució dels difusors al fons del dipòsit



Figura 34. Difusor d'aire de bombolla fina. Font: www.sulzer.com

Per saber el compressor a utilitzar s'ha de tenir en compte el cabal d'aire que es necessita subministrar i la pressió que s'ha de vèncer. El compressor s'haurà de situar a l'interior de la fàbrica per evitar que a l'hivern l'aire estigui a temperatures molt baixes.

El caudal d'aire total que s'ha de subministrar és la suma del cabal en el reactor i el tanc homogeneïtzador, és a dir 10,4 m³/h totals.

La pèrdua de càrrega calculada és de 1,8 m.c.a. (\approx 2 m.c.a.) i s'ha de tenir en compte que s'ha de superar una pressió equivalent a 2,6 metres de columna d'aigua corresponent a l'aigua per sobre dels difusors, que és l'altura del tanc homogeneïtzador.

Per tant, el compressor com a mínim ha de subministrar un cabal de 10,4 m³/h i superar una pressió relativa de 4,6 m.c.a..



Figura 35. Exemple compressor d'aire . Font: www.becker-international.com

8.6. Sistema de mescla

S'instal·la un agitador en el reactor per aconseguir una bona mescla i augmentar l'eficiència de transferència d'oxigen en l'aigua. Per el sistema de mescla en el reactor s'utilitza una turbina radial de 4 pales per ser el més recomanat per la dispersió d'un gas en un líquid gràcies a que les paletes estan en un angle de 90°. Per les dimensions del reactor, el diàmetre de l'agitador ha de tenir un diàmetre d'entre 0,6 i 0,7 metres, una velocitat de rotació de 100 rpm. L'agitador s'haurà de posar a 0,5 m del fons del reactor. La potència mínima calculada és de 0,6 kW.



Figura 36. Agitador de turbina radial de 4 pales. Font: www.agitadoresfluidmix.com

8.7. Bombes

La instal·lació consta de 4 bombes, s'han seleccionat d'acord amb les característiques del fluid a tractar en cada cas. La primera s'utilitza per desplaçar l'aigua de la zona de producció fins al tamís rotatori, la segona per portar l'aigua del tanc homogeneïtzador fins al reactor biològic, la tercera per descarregar l'efluent i la última per extreure els fangs. Per aigües residuals es recomana instal·lar bombes submergibles per un millor funcionament del sistema, per tant les quatre s'elegeixen submergibles. Les bombes són peces molt importants en un sistema de tractament d'aigües, és per això que es seleccionen bombes d'alta qualitat perquè tinguin una llarga vida útil i funcionin correctament.

Bomba 1:

L'aigua residual de la cerveseria pot contenir sòlids com el bagàs, per tant la bomba ha de poder suportar-ne el seu pas. L'aigua també pot contenir productes de neteja i contaminants orgànics del procés. S'ha de tenir en compte que l'aigua provenint de la producció pot tenir temperatures al voltant de 40°C o superiors en moments puntuals.

Es considera un cabal màxim de 150 L/min, equivalent a 9 m³/h. S'han calculat unes pèrdues de càrrega en la canonada de 0,6 m.c.a. (\approx 1 m.c.a.) a més d'haver-se de superar una altura geomètrica de 3 m des de l'arqueta a la zona de producció fins a la part superior del tamís, obtenint una pressió relativa total de 4 m.c.a.

Ha de ser una bomba submergible apte per aigües residuals que permeti el pas de sòlids i temperatures al voltant de 50°C. Ha d'incorporar un flotador per controlar automàticament l'emplenament del tanc homogeneïtzador (passant pel tamís).



Figura 37. Bomba per a aigües residuals amb sòlids fins a 50mm. Font: www.ebara.es

Bomba 2:

S'han eliminat la majoria de sòlids de l'aigua, però queda la majoria de matèria orgànica. Es considera un cabal màxim de $3 \text{ m}^3/\text{h}$, s'han calculat una pèrdues de càrrega en les canonades de 0,35 m.c.a. ($\approx 0,5 \text{ m.c.a.}$) i s'ha de superar una altura geomètrica de 2,5 m des del fons del tanc homogeneïtzador fins al reactor, obtenint una pressió relativa total de 3 m.c.a.

Ha de ser una bomba submergible apte per aigües carregades amb un flotador que serveix com a sistema de seguretat del tanc homogeneïtzador.



Figura 38. Bomba submergible per aigües carregades. Font: www.bombashasa.com

Bomba 3:

La descàrrega de l'efluent és una etapa molt important en el procés, ja que si no es realitza correctament els fangs es poden barrejar amb l'aigua tractada. L'objectiu és extreure l'efluent lentament, causant el mínim de turbulència en el reactor perquè els fangs no es barregin amb l'aigua. Com que el tanc no és suficientment gran per la instal·lació d'un decantador especial per sistemes SBR, s'opta per instal·lar una bomba de mínima potència i petit diàmetre d'impulsió. Aquesta bomba es subjectarà sobre una plataforma d'altura ajustable (Figura 39). D'aquesta forma el reactor podrà operar durant tot l'any encara que el nivell de fangs sigui diferent.

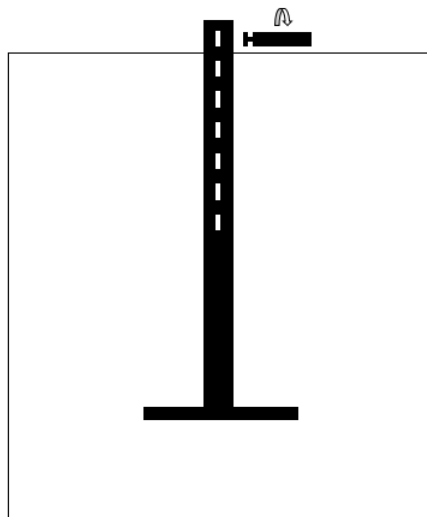


Figura 39. Plataforma per ajustar l'altura de la bomba.

Es considera també un caudal màxim de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ i s'han calculat unes pèrdues de càrrega de 1 m.c.a.. L'altura geomètrica màxima que s'ha de superar és igual a 1,5 metres. S'obté una pressió relativa a superar igual a 2,5 m.c.a.



Figura 40. Bomba per descàrrega de l'efluent. Font: www.bombasperfecta.es

Bomba 4:

Aquesta bomba ha de bombejar els fangs del fons del reactor fins al dipòsit on són recollits, per tant ha de permetre el pas de sòlids filamentosos. Es considera un cabal màxim de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, les pèrdues de càrrega calculades són 0,3 m.c.a. ($\approx 0,5 \text{ m.c.a.}$) i s'ha de superar una altura geomètrica d'aproximadament 3,5 m, donant una altura total d'uns 4 m.c.a.

Ha de ser una bomba submergible apte per fangs o per aigües amb sòlids filamentosos, sense flotador ja que la bomba 3 ja incorpora flotador coma a sistema de seguretat del reactor.



Figura 41. Bomba per aigües residuals carregades i amb sòlids filamentosos. Font: www.bambashasa.com

8.8. Canonades i vàlvules

El diàmetre de les canonades s'ha seleccionat a partir del cabal que circula per elles i d'acord amb la bomba seleccionada, en funció de la sortida del tamís o el compressor i difusors utilitzats. Les característiques de les canonades d'aigua (Taula 18) i aire (Taula 19) es mostren a continuació:

8.8.1. Canonades d'aigua

Per les canonades d'aigua s'utilitza el material PCV-U rígid per a canonades de pressió, apte per aigües residuals, les canonades d'aigua s'ha dividit en trams, que s'observen a la :

Tram	Diàmetre	Longitud (m)	nº colzes
1	2"	12	5
2	7"	2	2
3	1 1/4"	5	2
4	1"	5	3
5	1 1/4"	6	5

Taula 18. Característiques de les canonades d'aigua.

També són necessàries maneguets (Figura 42) per connectar les canonades amb les bombes corresponents. Aquestes juntes han de tenir un extrem llis per poder-se unir amb la canonada i l'altre extrem amb rosca per poder-se unir a l'aparell corresponent. En el cas del tamís, el maneguet ha de ser llisa els dos costats.



Figura 42. Unió PVC llis amb rosca per unir als diferents equips. Font: www.aliaxis-ui.es

Per subjectar les canonades s'utilitzen suports separats per una distància recomanada pel fabricant. En el cas de les canonades de 2", s'utilitza un suport cada 1,8 metres, en les canonades de 1 1/4" s'instal·la un suport cada 1,35 metres.



Figura 43. Suport per canonades de PVC. Font: www.aliaxis-ui.es

Així, considerant que es tenen 18 metres de canonada de 2" i 10 metres de canonada 1 1/4", s'obté:

$$n^{\circ} \text{ suports } (\varnothing = 2") = \frac{18}{1,8} = 10 \text{ suports} \quad \text{Eq. 71}$$

$$n^{\circ} \text{ suports } (\varnothing = 1 \frac{1}{4} ") = \frac{10}{1,35} = 7,4 \approx 8 \text{ suports} \quad \text{Eq. 72}$$

Les canonades, colzes i altres elements de PVC-U s'uneixen mitjançant un producte de neteja i una cola especial per canonades de PVC-U.



Figura 44. Producte neteja PVC-U.
Font: www.generaladhesivos.com



Figura 45. Cola PVC-U.
Font: www.generaladhesivos.com

8.8.2. Canonades d'aire

Per les canonades d'aire s'utilitza el material "GIRAIR", fabricades de PVC dúctil especial per aire comprimit, segons el fabricant el diàmetre òptim de la canonada fins als tancs és 1" i el diàmetre de la canonada a on es connecten els difusors bé definida pels mateixos difusors i és de 3".

Tram	Diàmetre	Longitud (m)	n° colzes
1'	1"	0,5	1
2'	1"	10	5
3'	3"	1	0
4'	1"	10	5
5'	3"	1	0

Taula 19. Característiques de les canonades d'aire

A més, es necessita una T a 90° (Figura 46) a la sortida del compressor per dividir la canonada d'aire en dos, la primera anirà cap al tanc homogeneïtzador i la segona cap al reactor biològic. El diàmetre d'aquesta conjunta ha de ser de 1" igual que la canonada.



Figura 46. Conjunta en forma de T. Font: www.girpi.com

Per unir la canonada de $d=1''$ amb la de $D=3''$ es necessita una T a 90° reductora (Figura 47). Es necessiten dos peces, una pel tanc homogeneïtzador i l'altre pel reactor biològic.



Figura 47. Conjunta reductora en forma de T. Font: www.girpi.com

Els extrems de la canonada de 3" s'han de tancar amb un tap, ja que l'aire ha de sortir pels difusors.

Es posen unes vàlvules de bola (Figura 48) a les canonades 2' i 4' per poder obrir i tancar manualment el flux d'aire cap al tanc homogeneïtzador o reactor independentment entre ells per si fos necessari en algun moment determinat.



Figura 48. Vàlvula manual de doble unió. Font: www.girpi.com

Per subjectar les canonades s'utilitzen suports (Figura 49) separats per una distància recomanada pel fabricant. En el cas de les canonades de 1", en els trams horitzontals s'utilitza un suport cada 1,3 metres i en els trams verticals un cada 2,2 metres. Per altre banda, en les canonades de 3" horitzontals s'ha de posar un suport cada 2,1 metres i en les verticals cada 3,1.

Com a trams verticals es consideren l'altura del tancs i la resta de trams es consideren horitzontals. Així, considerant que es tenen 20,5 metres de canonada de 1", dels quals 4,5 m són verticals i 16 m horitzontals, es necessiten:

$$n^{\circ} \text{ suports } (\varnothing = 1") = \frac{4,5}{2,2} + \frac{16}{1,3} = 14,35 \approx 15 \text{ suports} \quad \text{Eq. 73}$$

De canonada de 3" es necessiten 8 metres, tots horitzontals:

$$n^{\circ} \text{ suports } (\varnothing = 3") = \frac{8}{2,1} = 3,8 \approx 4 \text{ suports} \quad \text{Eq. 74}$$



Figura 49. Suports per subjectar les canonades d'aire. Font: www.girpi.com

Les diferents peces que formen la canonada d'aire s'uneixen entre si utilitzant un producte de neteja (CLEANER+) i un polímer de soldadura (GAFIX).



Figura 50. CLEANER+. Font: www.girpi.com



Figura 51. GAFIX. Font: www.girpi.com

8.9. Control i automatització

Per tenir control sobre el correcte funcionament del reactor i sobre les etapes del cicle són necessaris una sèrie de sensors i temporitzadors. Els temporitzadors s'instal·len tots en una armari elèctric (Figura 52), on també són portats els senyals dels sensors, des d'aquesta caixa surten les senyals per regular el pH en el tanc homogeneïtzador, el subministrament d'oxigen, el control de les bombes i del motor de l'agitador.

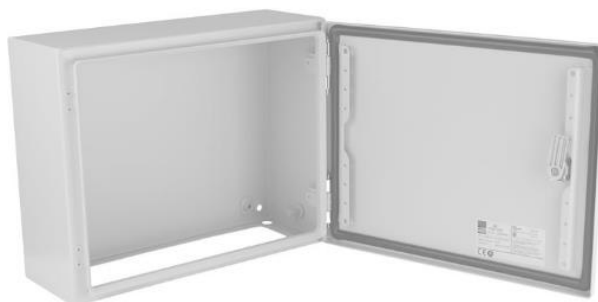


Figura 52. Armari elèctric. Font: www.automation24.es

8.9.1. Control de pH

Sensor de pH

Per mesurar i neutralitzar el pH en el tanc homogeneïtzador s'utilitza un elèctrode de pH (Figura 53), resistent a brutícies. Es necessita un porta-elèctrodes d'immersió (Figura 54) per subjectar-lo.



Figura 53. Sensor de pH 2. Font: www.dosatronic.de/es



Figura 54. Porta elèctrodes d'immersió. Font: www.dosatronic.de/es

També és necessari un cable de connexió de 10 metres per la connexió cap a la caixa de control.

Controlador de pH

La senyal del sensor de pH es connecta a un panell controlador per a dos canals (Figura 55). En el controlador es pot programar el valor desitjat del paràmetre i s'envien les senyals unes bombes dosificades connectades a uns dipòsits amb unes solucions per augmentar o disminuir el pH.



Figura 55. Controlador de dos canals DCW230. Font: www.dosatronic.de/es

En el cas del pH, no és necessari que es regular-lo constantment, sinó que només és necessari ajustar-lo com a mínim 30 minuts abans de l'emplenament del tanc, per tant el pH només s'ha de regular 1 vegada per cycle. L'ajust del pH es recomana realitzar-lo l'última hora de la fase de reacció, així s'aprofita que el compressor està en marxa per homogeneïtzar les aigües. Per l'ajust del pH són necessaris dos dipòsits petits, un amb una substància per augmentar el pH i l'altre per disminuir-lo, controlats per unes bombes que operen en funció de la senyal del controlador. Perquè el pH no es reguli constantment, s'instal·la un temporitzador en el sistema que només deixi actuar les bombes dosificadores de pH un temps abans de l'emplenament del tanc.



Figura 56. Sistema de dosificació. Font: www.dosatronic.de/es

8.9.2. Control d'oxigen dissolt

Per mesurar la concentració d'oxigen dissolt en el reactor s'utilitza un elèctrode d'oxigen de membrana (Figura 57) en el tanc, subjectat per un porta-elèctrodes.



Figura 57. Elèctrode d'oxigen dissolt de membrana.
Font: www.crisoninstruments.es



Figura 58. Porta elèctrodes d'immersió. Font:
www.dosatronic.de/es

8.9.3. Control d'oxigen dissolt

Igual que la senyal del sensor de pH, la del sensor l'oxigen també es connecta a un panell controlador monocanal (Figura 59). Des del controlador s'envia una senyal al compressor perquè aquest actuï en funció del requeriment d'oxigen en el reactor.



Figura 59. Controlador monocanal. Font: www.dosatronic.de/es

8.9.4. Temporitzadors

Per controlar les etapes del procés, s'utilitzaran temporitzadors que controlen les bombes 2, 3 i 4, d'aquesta forma es pot controlar l'emplenament descàrrega del reactor. També s'instal·len temporitzadors en l'agitador i compressor perquè s'apaguin durant la fase de sedimentació i puguin sedimentar correctament els fangs. En total es necessiten 5 temporitzadors més el necessari pel control del pH.

En total s'han d'instal·lar 6 temporitzadors, que es puguin programar des de pocs minuts fins a 24 hores.



Figura 60. Temporitzador. Font: www.omron.es

Apart dels temporitzadors, són necessaris adaptadors pel muntatge al panell, endolls pels relés, cobertes protectores i un clips de fixació.



Figura 61. Adaptador. Font: www.digikey.es



Figura 62. Endoll pel relés. Font: www.digikey.es

9. POSADA EN MARXA I RECOMANACIONS D'OPERACIÓ

Per la posada en marxa del reactor, aquest s'ha d'omplir amb fangs provinent d'una altre depuradora i s'ha de fer operar fins que el fang s'adapti a les característiques de l'aigua residual de la cerveseria. Aquest procés pot tardar unes 3 o 4 setmanes.

El sistema s'ha dissenyat per treballar amb cicles de 24 hores i temps de retenció de fangs de 7 dies. S'han de recollir mostres setmanals o mensuals per mirar quins són els paràmetres específics d'aquesta instal·lació i utilitzant l'eina d'Excel es poden ajustar les variables d'operació (cicles per dia i temps de retenció de sòlids o purga de fangs) del procés per fer-lo operar correctament. Els paràmetres més importants a comprovar són: la concentració de fangs en el reactor (X) y les concentracions paràmetres que s'han de complir segons la normativa en els corrents d'entrada i sortida de l'EDAR (DBO₅, DQO, MES, T, pH, N i F).

És d'interès saber les diferències més significatives de les característiques de l'aigua residual en diferents estacions de l'any per poder ajustar les variables d'operació en funció de les dades obtingudes en cada època de l'any.

Si es detecten problemes amb els fangs, es pot realitzar un anàlisi microscòpic dels fangs per identificar els microorganismes presents, a partir d'aquest anàlisi és possible trobar les causes del mal funcionament del sistema i es poden modificar les condicions d'operació.

10. LEGISLACIÓ

Les normativa aplicada a la gestió de residus industrials a Catalunya:

Decret legislatiu 1/2009, de 21 de juliol, pel qual s'aprova el text refós de la Llei reguladora dels residus.

El decret 152/2017, de 17 d'octubre, sobre la classificació, la codificació i les vies de gestió dels residus a Catalunya.

Tota la normativa aplicada als residus es pot trobar a pàgina de l'Agència de Residus de Catalunya¹.

La normativa aplicada al tractament d'aigües residuals:

El Decret 130/2003, de 13 de maig, a partir de les previsions de la normativa europea com la Directiva 91/271/CE i la Directiva 2000/60/CE del Parlament Europeu i del Consell, del 23 d'octubre, per la qual s'estableix un marc comunitari d'actuació en l'àmbit de la política d'aigües.

Decret legislatiu 3/2003, de 4 de novembre, pel qual s'aprova el text refós de la legislació en matèria d'aigües de Catalunya.

Reglament d'abocament d'aigües residuals de la comarca del Ripollès, de 18 de juny de 2010.

¹ http://residus.gencat.cat/ca/consultes_i_tramits_-_nou/normativa/

11. IMPACTE AMBIENTAL

Pel que fa als objectius del projecte en si mateixos, s'ofereix informació per a les indústries cerveseres per a la reutilització o reciclatge dels residus que es generen. Més concretament, es presenta un model de depuració d'aigües residuals d'una microcerveseria, que concentra la carga contaminant de les aigües en forma de fangs, més fàcils de gestionar.

A més, cal recalcar que els residus del procés i els fangs són residus orgànics sòlids que poden ser reutilitzats o com a mínim reciclats, complint el propòsit de l'economia circular.

Anàlisi econòmic

L'anàlisi econòmic del projecte s'ha separat en 4 parts: Elaboració del projecte, materials i aparells, cost d'obra i cost d'instal·lació.

11.1. Elaboració del projecte

El cost de disseny del projecte es desglossa en tres parts. Les hores dedicades a la recerca d'informació, les hores dedicades al disseny de l'EDAR i les hores dedicades a la redacció de la memòria, considerant el sou d'un enginyer de 20 €/h:

Concepte	Hores	Salari (€/h)	Cost (€)
Recerca d'informació	120	20	2.400
Disseny reactor	170	20	3.400
Redacció memòria	260	20	5.200
Hores enginyer	550	20	11.000

A més, es tenen les hores realitzades pel director del projecte. Considerant un sou del director de 35 €/h, el cost associat és:

Concepte	Hores	Salari (€/h)	Cost (€)
Hores supervisor	40	35	1.400

El cost total associat a l'elaboració de la projecte és 12.400 €.

11.2. Materials i aparells

Elements principals del sistema

Producte	Unitats	Cost per unitat (€)	Cost (€)
Tanc homogeneïtzador 10 m ³	1	2.334,00	2.334,00
Tanc reactor 5,8 m ³	1	1.496,00	1.496,00
Tamís estàtic TE-500	1	2.300,00	2.300,00
TOTAL elements principals	3	-	6.130,00

Accessoris

Producte	Unitats	Cost per unitat (€)	Cost (€)
Compressor aire DT 4.16	1	1.163,31	1.163,31

Agitador de paletes VTR	1	2.322,00	2.322,00
Bomba Ebara DW VOX M 0,75	1	848,00	848,00
Bomba Hasa MINIPAF M-4	1	278,00	278,00
Bomba Perfecta AD 40M	1	256,60	342,60
Bomba Hasa MINIPAF M-4 D	1	278,00	278,00
Dipòsit IBC 1 m ³	4	195,00	780,00
Plataforma bomba	1	220,00	220,00
Estructura pel tamís	1	330,00	330,00
TOTAL accesoris	12	-	6.561,31

Xarxa d'aigua

Producte	Unitats	Cost per unitat (€)	Cost (€)
Tub PVC-U 2" (5 m)	4	24,62	98,48
Tub PVC-U 7" (5 m)	1	199,73	199,73
Tub PVC-U 1 1/4" (5 m)	2	10,50	21,00
Colze 90° PVC-U 2" (5 ut.)	2	11,90	23,80
Colze 90° PVC-U 7" (2 ut.)	1	94,69	94,69
Colze 90° PVC-U 1 1/4" (10 ut.)	1	11,40	11,40
Maneguet PVC-U 2" (10 ut.)	1	27,20	27,20
Maneguet PVC-U 7" (2 ut.)	1	111,74	111,74
Maneguet PVC-U 1 1/4" (10 ut.)	1	15,90	15,90
Suports ZIKM 2" (10 ut.)	1	29,90	29,90
Suports ZIKM 1 1/4" (10 ut.)	1	21,20	21,20
Cola PVC-U 1L	1	23,94	23,94
Netejador PVC-U 1L	1	15,36	15,36
TOTAL xarxa d'aigua	16	-	694,34

Xarxa d'aire

Producte	Unitats	Cost per unitat (€)	Cost (€)
Difusor ABS PIK 300	4	28,60	114,4
Tub "GIRAIR" 1" (4m)	6	35,40	212,4
Tub "GIRAIR" 3" (4m)	1	95,72	95,72

Colze "GIRAIR" 1"	11	5,14	56,54
T a 90° "GIRAIR" 1"	1	7,29	7,29
T a 90° reductora "GIRAIR" 1"- 3"	2	117,39	234,78
Vàlvula de bola "GIRAIR" 1"	2	70,71	141,42
Suports clip 1"	15	4,13	61,95
Suports clip 3"	4	16,25	65,00
Cola GAFIX 250 mL	1	29,59	29,59
Cleaner + 250 mL	1	16,46	16,46
TOTAL xarxa d'aire	48	-	1.035,55

Control i automatització

Producte	Unitats	Cost per unitat (€)	Cost (€)
Sensor PHRT2	1	175,10	175,10
Porta-elèctrodes ETA	2	176,25	352,50
Cable 10 m	1	55,50	55,50
Controlador DCW230	1	1.419,65	1.419,65
Sistema dosificació DOSADos	2	342,60	685,20
Sensor OD de membrana	1	1.416,25	1.416,25
Controlador OD	1	1.213,35	1.213,35
Temporitzador H3CR-A	6	54,60	327,60
Adaptador panell Y92F-30	6	11,36	68,16
Endoll relés P3G-08	6	21,79	130,74
Tapa Y92A-48B	6	6,43	38,58
Clip Y92-H8	6	2,57	15,42
Armari elèctric	1	55,42	55,42
TOTAL control i automatització	40		5.953,47

Total materials i aparells

Materials i aparells	Cost (€)
Elements principals	6.130,00
Accessoris	6,561,31
Xarxa d'aigua	694,34

Xarxa d'aire	1.035,55
Control i automatització	5.953,47
TOTAL materials i aparells	20.374,67

11.3. Cost d'obra

En el cost d'obra, inclou principalment l'excavació del forat on es situen els dos dipòsits (homogeneïtzador i reactor), la llosa de formigó perquè es puguin situar els dipòsits i la construcció de les dos arquetes. La realització d'aquestes tasques té un cost de 7.600 €.

11.4. Cost d'instal·lació

El cost d'instal·lació de la planta inclou la instal·lació i connexió de totes les parts del procés mitjançant les canonades, incloent si s'escau la perforació de parets. També la instal·lació elèctrica de tots els aparells i sensors.

El cost aproximat per realitzar aquestes tasques és de 5.300 €

11.5. Cost total del projecte

El cost total del projecte és la suma de tots els costos específics estimats anteriorment

Elaboració projecte	12.400,00 €
Materials i aparells	20.374,67 €
Cost d'obra	7.600,00 €
Cost d'instal·lació	5.300,00 €
TOTAL sense IVA	45.674,67 €
Factor per imprevistos (5%)	2.283,73 €
TOTAL PROJECTE sense IVA	47.958,40 €
IVA (21%)	10071,26 €
TOTAL projecte	58.029,66 €

El pressupost total del projecte és de cinquanta-vuit mil vint-i-nou euros i seixanta-sis cèntims.

CONCLUSIONS

En aquest apartat es presenten les conclusions obtingudes a la realització del projecte:

- S'han identificat els principals residus del procés d'elaboració de cervesa artesana i s'han enumerat possibles aplicacions.
- S'ha constatat que els residus de la cerveseria es poden valoritzar complint els principis de l'economia circular.
- S'han proposat les millors vies de gestió pels residus segons el Catàleg de Residus de Catalunya.
- S'ha considerat que l'aigua residual d'una microcerveseria pot ser tractada a través d'un procés d'oxidació biològica realitzant els tractaments previs adequats i controlant els paràmetres del procés.
- S'ha determinat que el reactor discontinu seqüencial és ideal pel tractament d'aigües residuals de cabals petits i irregulars gràcies al control sobre les etapes i variables del procés.
- S'ha dissenyat una estació depuradora d'aigües residuals (EDAR) tenint en compte les característiques de l'aigua residual d'una microcerveseria.
- S'ha realitzat el pressupost de la instal·lació de l'EDAR.

Bibliografia

- Alemany, Jaume, M. Dolors Balaguer, August Bonmatí, Jesús Colprim, Joaquim Comas, Maria J. Martín, Manel Poch, et al. 2009. “Capítol 3. Tecnologies de Tractament.” *Universitat de Girona*.
- Aliyu, Salihu, and Muntari Bala. 2011. “Brewer ’ s Spent Grain : A Review of Its Potentials and Applications.” *African Journal of Biotechnology* 10 (3): 324–31. <https://doi.org/10.4314/ajb.v10i3>.
- Arora, Madan L, Edwin F Barth, Margaret B Umphres, L Arora, Edwin F Barth, and B Umphres. 2015. “Evaluation Technology Reactors Batch of Sequencing” 57 (8): 867–75.
- Blasi, Josep. 2006. “DE SISTEMES DE TRACTAMENT D’ AIGÜES RESIDUALS, SEQUENCING BATCH REACTOR.”
- Brewers Association, SA. n.d. “Water and Wastewater : Treatment / Volume Reduction Manual,” 1–47.
- Brewers Associatoin, BA. n.d. “Wastewater Management Guidance Manual,” 1–31.
- Briggs, Dennis E., Chris A. Boulton, Peter A. Brookes, and Roger Stevens. 2004. *Brewing: Science and Practice*. *Brewing: Science and Practice*. <https://doi.org/10.1533/9781855739062>.
- Driessen, W, and T Vereijken. 2003. “Recent Developments in Biological Treatment of Brewery Effluent.”
- Ferreira, I. M.P.L.V.O., O. Pinho, E. Vieira, and J. G. Tavarela. 2010. “Brewer’s Saccharomyces Yeast Biomass: Characteristics and Potential Applications.” *Trends in Food Science and Technology* 21 (2): 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.008>.
- Gürtekin, Engin. 2014. “Sequencing Batch Reactor.”
- Hieronymus, Stan. 2012. *For the Love of Hops, The Practical Guide to Aroma, Bitterness and the Culture of Hops*. Brewers Association.
- Huige, Nick. 2006. “Brewery By-Products and Effluents. Handbook of Brewing, Second Edition,” 655–713. <https://doi.org/10.1201/9781420015171.ch18>.
- Huxley, Steve. 2011. “Cerveza: Poesía Líquida (2ª Edición).”
- Irvine, Robert L. 1989. “Sequencing Batch Reactor for Biological Wastewater Treatment,” no. May. <https://doi.org/10.1080/10643388909388350>.
- Jern, Wun. 2006. *Industrial Wastewater Treatment*. Imperial College Press.
- Kanagachandran, K, R Jayaratne, and J Inst Brew. 2006. “Utilization Potential of Brewery Waste Water Sludge as an Organic Fertilizer” 112 (2): 92–96.
- Kebede, Teklit Baraki. 2018. “Waste Water Treatment in Brewery Industry , Review” 6 (1): 716–22.
- Kerby, Clare, and Frank Vriesekoop. 2017. “An Overview of the Utilisation of Brewery By-Products as Generated by British Craft Breweries.” *Beverages* 3 (2): 24.

<https://doi.org/10.3390/beverages3020024>.

Ling, L, and K V Lo. 2015. "Brewery Wastewater Treatment Using Suspended and Attached Growth Sequencing Batch Reactors" 4529 (November). <https://doi.org/10.1080/10934529909376840>.

Mallett, John. 2014. *Malt: A Practical Guide from Field to Brewhouse*. Brewers Association.

Mussatto, S. I., G. Dragone, and I. C. Roberto. 2006. "Brewers' Spent Grain: Generation, Characteristics and Potential Applications." *Journal of Cereal Science* 43 (1): 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>.

Ockert, Karl. 2002. "Practical Wastewater Pretreatment Strategies for Small Breweries."

Orhon, D., and N. Artan. 1994. "Modelling of Activated Sludge Systems." Technomic publishing company.

Palmer, John, and Colin Kaminski. 2013. *Water: A Comprehensive Guide for Brewers. Physical Review B*. Vol. 72. Brewers Association.

Plymouth Technology. 2014. "Technical Bulletin: Settleable Solids - Imhoff Cone Test Instructions."

Santos, Thiago dos, Pedro Moretzohn, and Eliana Camporesse. 2014. "Solid Wastes in Brewing Process: A Review." *Journal of Brewing and Distilling* 5 (July): 1–9. <https://doi.org/10.5897/JBD2014.0043>.

Vriens, L., H. Van Soest, and H. Verachtert. 1990. "Biological Treatment of Malting and Brewing Effluents."

Wang, Lawrence K, and Yan Li. 2009. "Sequencing Batch Reactors" 8.

White, Chris, and Jamil Zainasheff. 2010. *Yeast: The Practical Guide to Beer Fermentation. European Heart Journal*. Vol. 28. Brewers Association.