

Universitat Rovira i Virgili

Facultat de Química



Grau de Química

Curs acadèmic 2023/24

Treball de fi de Grau

Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Autora: **Sara Soler Rico**

Tutor acadèmic: **Ricard Boqué**

Tutors professionals: **Santiago Llauradó**

Jordi Rodon





Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

AUTORITZACIÓ

per al dipòsit de la memòria del Treball de Fi de Grau
per a la seva avaluació i defensa

Nom de l'alumne/a: Sara Soler Rico

Títol del TFG: Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Nom del director/a del treball: Santiago Llauradó Margalef

Data:

Signatura: Firmado por ***6516** SANTIAGO
LLAURADO (R: ****5630*) el día
12/06/2024 con un certificado
emitido por AC Representación

Nom del/de la tutor/a acadèmic/a: Ricard Boqué Martí

Data:

Signatura:



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Ricard Boqué
Martí
2024.06.12

12:26:59 +02'00'



ÍNDIX

1. RESUM	4
1.1 En català	4
1.2 En anglès.....	4
2. OBJECTIU	4
3. MARC TEÒRIC	5
3.1 INTRODUCCIÓ	5
3.2 FONAMENTS	5
3.2.1 Bassa o tanc de decantació	6
3.2.2 Separació fracció sòlida/líquida per centrifugació amb <i>decanter</i>	6
3.2.3 Separació fracció sòlida/líquida per sistemes de flotació per aire dissolt: DAF.....	7
3.2.4 Sistemes de filtració per ultrafiltració (UF)	8
3.2.5 Sistemes de filtració per osmosi inversa (RO)	8
3.2.6 Sistemes d'evaporació al buit (EVAP).....	9
3.2.7 Sistemes de cristallització per evaporació al buit.....	10
3.3 ANTECEDENTS BIBLIOGRÀFICS	12
4. MARC EXPERIMENTAL	13
4.1 Viscositat	13
4.1.1 <i>Descripció de l'assaig realitzat</i>	13
4.2 Densitat	14
4.2.1 <i>Descripció de l'assaig realitzat</i>	14
4.3 Sòlids totals (TS)	15
4.3.1 <i>Reactius utilitzats</i>	15
4.3.2 <i>Manipulació i emmagatzematge</i>	16
4.3.3 <i>Descripció de l'assaig realitzat</i>	16
4.3.A Sòlids totals dissolts (TDS).....	18
4.3.B Sòlids totals en suspensió (TSS).....	18
4.4 Conductivitat elèctrica (CE)	19
4.5 Augment ebulloscòpic	20
4.5.1 <i>Descripció de l'assaig realitzat</i>	20
4.6 Olis i greixos	21



5. CAS PRÀCTIC REAL	22
5.1 Viscositat	22
5.2 Densitat	22
5.3 Sòlids totals (TS)	23
5.3.A Sòlids dissolts (TDS)	23
5.3.A.1 Solubilitat de les sals.....	24
5.4 Conductivitat.....	25
5.5 Augment ebullioscòpic	26
6. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	27
6.1 Viscositat	27
6.1.1 Importància de la viscositat	28
6.2 Densitat:	29
6.2.1 Importància de la densitat	30
6.3 Sòlids totals (TS)	31
6.3.1 Sòlids totals dissolts (TDS)	32
6.3.2 Sòlids totals en suspensió (TSS)	33
6.4 Conductivitat elèctrica.....	33
6.5 Augment ebullioscòpic	34
6.5.1 Importància de l'augment ebullioscòpic	35
7. RESULTATS MOSTRA C.....	37
8. ANÀLISI ECONÒMIC DE LES DIFERENTS CONFIGURACIONS PROPOSADES DE SISTEMES "ZERO LIQUID DISCHARGE"	39
9. CONCLUSIONS.....	45
9.1 En català.....	45
9.2 En anglès	46
10. BIBLIOGRAFIA.....	47
11. ANNEX	49



1. RESUM

1.1 En català

La crisi hídrica global, causada pel fort creixement d'activitats agrícoles i la industrialització, l'esgotament de les matèries primeres, la contaminació ambiental, la producció d'energia i l'augment del consum energètic, representa un greu problema social per la recuperació i/o reutilització d'aigua adequada per diverses aplicacions. De tal manera que es plantegen diferents alternatives pel tractament d'unes aigües residuals industrials utilitzant la tecnologia del *Zero Liquid Discharge (ZLD)*, havent descrit prèviament teòricament i de forma experimental, els paràmetres físico-químics necessaris en funció de la composició química i comportament de l'efluent a tractar, en el laboratori del Departament de Química de l'empresa *Zewatech*.

1.2 En anglès

The global water crisis, caused by the rapid growth of agricultural activities and industrialization, the depletion of raw materials, environmental pollution, energy production, and the increase in energy consumption, represents a serious social problem regarding the recovery and/or reuse of adequate water for various applications. Therefore, different alternatives for the treatment of industrial wastewater are being proposed using the technology of *Zero Liquid Discharge (ZLD)*. The necessary physico-chemical parameters, based on the chemical composition and behavior of the effluent to be treated, having described previously in a theoretical and experimental way in the laboratory of the Chemistry Department at the company *Zewatech*.

2. OBJECTIU

L'objectiu del treball de fi de grau és definir les diferents alternatives possibles per tal de trobar una solució i/o disminuir la major crisi hídrica mundial mai registrada, causada pel fort creixement de les activitats agrícoles, la industrialització i la urbanització, agregat al fenomen de superpoblació que s'està experimentant a escala global, d'unes aigües residuals industrials en concret.

Per a tal finalitat s'hauran de:

- Determinar la viabilitat de tractar aigües de diferent procedència industrial, basant-me en la seva composició orgànica/inorgànica i el seu comportament químic.
- Definir els percentatges de reducció de residus màxims esperats d'un cas pràctic real, on se seleccionaran els processos necessaris mínims per a dur a terme un sistema de descàrrega zero de líquids, de l'anglès "*Zero Liquid Discharge*", (ZLD), junt amb l'anàlisi de CAPEX (capital d'inversió per m³) i OPEX (costos operatius per m³) de cadascuna de les alternatives proposades.



3. MARC TEÒRIC

3.1 INTRODUCCIÓ

La importància de l'aigua s'aprecia en considerar el seu enorme consum a països desenvolupats, arribant, en medis urbans, a valors globals de fins a 650 litres per habitant i dia. Aquest fet exigeix que l'aigua en la seva totalitat compleixi amb l'estricta normativa del Reial decret 3/2023, de 10 de gener, pel qual s'estableixen els criteris tècnic-sanitaris de la qualitat de l'aigua de consum, el seu control i subministrament ^{1,2}. L'aigua, en el seu ús, acumula substàncies que la fan adquirir propietats perjudicials per a la salut dels organismes, de manera que ha de ser descontaminada i procurar que provoqui una mínima pertorbació en l'ecosistema, encara que la major part de la quantitat d'aigua estigui destinada per altres usos. El problema principal en l'àmbit mundial radica en la carència d'un abastiment d'aigua segur. ³

Centrant-nos en el món de l'aigua residual industrial, aquesta s'entén com l'aigua resultant dels processos industrials que ha estat afectada negativament per l'acció de l'ésser humà. Tota mena d'aigua derivada de fàbriques, plantes de producció d'energia, de consumibles o manufactureres són considerades aigües residuals industrials. En funció de la seva procedència, presentarà una sèrie d'agents contaminants, com poden ser: greixos, microplàstics, tensioactius generats per sabons o detergents, matèria orgànica, herbicides, plaguicides, etc. alguns dels quals poden arribar a presentar un nivell de toxicitat elevat. Per aquesta raó, ha de ser tractada abans de poder abocar-se o reutilitzar-se en el mateix procés industrial, ja que poden contaminar les aigües naturals a nivell físic, químic i/o biològic.

Pel que fa a la gestió i tractament dels efluent residuals industrials, s'escull un pre i/o post tractament per tal que l'abocament no perjudiqui ni causi cap impacte mediambiental en la mesura més gran possible. L'objectiu és arribar a ZLD, però si no és possible, cal aplicar els tractaments necessaris, els quals s'expliquen amb detall a continuació, per la seva adequació als límits d'abocament establerts per la llei vigent.

Per poder definir els elements que conformen un sistema ZLD, és rellevant la caracterització de les aigües a tractar. Aquesta, es realitza en el laboratori del Departament de Química de l'empresa *Zewatech*, una companyia que s'encarrega del desenvolupament de tecnologies avançades d'evaporació orientat a la depuració d'aigües residuals.

3.2 FONAMENTS

S'analitzaran algunes de les alternatives concentradores i cristallitzadores comercialitzades industrialment, on s'estudiaran els seus avantatges i les seves limitacions, des d'una perspectiva química, però donant un pes important, a l'impacte mediambiental que representa el consum elèctric i el producte químic, a la inversió inicial, als costos d'operació i a l'amortització del procés.

Un procés de tractament d'aigües residuals consta de les següents etapes:

1. Tractament primari: Desengreixant, centrifugació, decantació.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

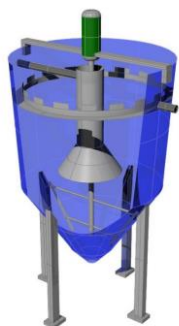
2. Tractament secundari: Tractament biològic amb membranes (MBR) o sense
3. Tractament terciari: Refinament amb ultrafiltració o osmosi inversa.
4. Evaporació i cristallització dels residus generats en els processos anteriors.

No es descriuran els principis de funcionament ni els principis físics de les diferents tecnologies, ja que no entra dins de l'abast del projecte, simplement es definiran les característiques necessàries per a poder dur a terme una anàlisi química coherent i una selecció òptima del procés a realitzar.

3.2.1 Bassa o tanc de decantació

És un equip que s'afegeix prèviament a la majoria dels processos de tractament d'aigües residuals i té diverses funcions. Per una banda, ens permet aconseguir un producte homogeni que facilitarà l'ajust dels diferents equips, ja que s'evitaran variacions significatives en l'anàlisi de l'aigua a tractar. L'etapa d'homogeneïtzació és important per la representativitat de les aigües residuals. Pel que fa al temps de residència, dependrà de les aigües en qüestió. ^{1,5}

Per una altra banda, permet estratificar les aigües i separar-les per densitats. Els sòlids en suspensió majoritàriament quedaran dipositats al fons mentre que els olis i els greixos quedaran a la part superior.



L'ús de tancs de decantació (il·lustració 1) per a l'eliminació de sòlids en suspensió en percentatges inferiors a l'1% no és justificable i en alguns casos és necessari l'ús de polielectròlits per a facilitar la separació, en aquests casos s'utilitza un tanc d'homogeneïtzació (HOMO).

És important realitzar la captació de l'aigua a una altura que permeti no aspirar ni els sòlids dipositats al fons ni els olis i greixos situats a la part superior, que seran extrets de forma periòdica amb les diferents tecnologies que ofereix el mercat.

Il·lustració 1: Tanc El principal avantatge de la bassa de decantació és que no requereix de consum elèctric, excepte en els processos d'extracció de sòlids, olis i greixos. A més, cal destacar que el cost d'inversió és relativament baix. Com a contra, és necessari disposar de l'espai suficient per a la instal·lació de la bassa o el tanc. ⁴

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'una instal·lació de bassa o tanc de decantació són principalment, els **sòlids en suspensió**, la **quantitat d'olis i greixos** i la **densitat** de l'aigua a tractar.

3.2.2 Separació fracció sòlida/líquida per centrifugació amb *decanter*

El sistema de centrifugació per *decanter* permet realitzar una separació de la fracció sòlida no dissolta present a les aigües, degut a la força centrífuga exercida pel *decanter* i a la



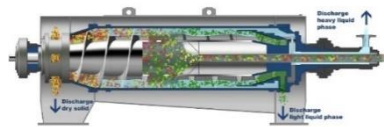
Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

diferència de densitat dels diferents components. Per a justificar la instal·lació d'un *decanter*, el percentatge de sòlids en suspensió ha de ser superior al 5%.

Els principals desavantatges de l'ús dels *decanter*s (il·lustració 2) en sistemes de ZLD és l'elevat cost d'inversió i el consum de policlorur d'alumini (PAC) requerit per a facilitar la separació de la fracció sòlida. Aquest, s'addiciona sobre la superfície de l'aigua, fent que les partícules s'uneixin entre si i sedimentin i puguin ser filtrades, és a dir, té la funció d'actuar com a coagulant i floculant.⁴

Com a avantatge principal es pot destacar un consum elèctric relativament baix. Per tant, la necessitat d'implementar un *decanter* en un sistema de ZLD, dependrà principalment del percentatge de sòlids, de la seva mida i de la seva densitat.

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un sistema de centrifugació amb *decanter* són principalment els **sòlids en suspensió i la densitat** de l'aigua a tractar.



Il·lustració 2: Sistema de separació fracció sòlida/líquida per centrifugació amb *decanter*

3.2.3 Separació fracció sòlida/líquida per sistemes de flotació per aire dissolt: DAF

Els sistemes de flotació per aire dissolt (DAF, de l'anglès *Dissolved Air Flotation*) considerats clarificadors, permeten novament fer una separació de la fracció sòlida, gràcies, per una banda, a l'acció d'un coagulant, ja que desestabilitza les partícules no dissoltes amb la finalitat de facilitar la separació, i, per una altra banda, l'acció del floculant, que atrau els floculs de menor grandària per a formar-ne d'altres de més grans. Finalment, amb l'ajuda d'un sistema de generació de microbombolles que s'adhereixen als floculs generats, s'aconsegueix separar les partícules sòlides no dissoltes, que queden flotant a la part superior i que posteriorment, són extretes.⁴

El percentatge de sòlids extrets en un sistema DAF és inferior a l'obtingut amb un sistema de *decanter*, però la qualitat de l'aigua obtinguda sol ser de major qualitat, per aquest motiu és comú realitzar una separació prèvia amb *decanter* i un refinament posterior amb un sistema DAF (il·lustracions 3 i 4).

El principal desavantatge de l'ús de sistemes DAF en processos de ZLD, torna a ser l'alt consum de productes coagulants i floculants, així com la baixa capacitat d'extracció de sòlids. Com a avantatge, però, podem destacar el baix cost d'inversió i un consum elèctric pràcticament nul.

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un sistema DAF són principalment els **sòlids en suspensió i la densitat** de l'aigua a tractar.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"



Il·lustració 3: DAF



Il·lustració 4: Mateix DAF des d'un altre angle

3.2.4 Sistemes de filtració per ultrafiltració (UF)

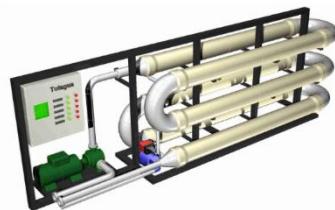
Els sistemes d'ultrafiltració permeten separar sòlids, tant dissolts com en suspensió, mitjançant membranes, polimèriques o ceràmiques. Per a garantir un rendiment òptim i reduir els períodes de neteja, però, es recomana haver eliminat prèviament els sòlids en suspensió.

L'interval de filtració és molt variable, però engloba un rang comprès aproximadament entre $0,1 \mu\text{m}$ i $0,006 \mu\text{m}$. Com a resultat obtenim un permeat, que conté aigua i molècules de mida inferior al grau de filtració i un concentrat que conté aigua, molècules de mida superior al grau de filtració i les molècules de mida inferior al grau de filtració que no han passat al permeat a causa del temps de residència de l'aigua dins de l'equip. El percentatge de permeat respecte al concentrat, variarà en funció de les aigües i el consum elèctric assumible. ^{4,5,29}

El principal avantatge dels sistemes d'ultrafiltració (il·lustració 5) és el baix cost d'inversió i consum energètic front a la gran quantitat de producte contaminant eliminat. Com a desavantatge podem considerar la necessitat de personal per operar el sistema, el cost de la reposició de les membranes i els consumibles de neteja utilitzats.

Alguns exemples de contaminants eliminables per un sistema d'ultrafiltració són les proteïnes, les gelatines, les emulsions, els pigments, els pirògens, les endotoxines, els virus, els fibrinògens i el silici col·loidal, entre d'altres.

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un sistema d'ultrafiltració són principalment els **sòlids en suspensió, els sòlids dissolts, la densitat i la viscositat** de l'aigua a tractar.



Il·lustració 5: Sistema de filtració per ultrafiltració

3.2.5 Sistemes de filtració per osmosi inversa (RO)

Els sistemes de filtració per osmosi inversa (il·lustració 6) realitzen una funció molt similar als sistemes d'ultrafiltració, amb la diferència que en aquest cas el percentatge de sòlids extrets és superior, contingut en un interval aproximat entre $0,003 \mu\text{m}$ i $0,0001 \mu\text{m}$.

El principal avantatge enfront dels sistemes d'ultrafiltració és que són capaços de filtrar fins a un grau de filtració menor, però estan limitades a aigües menys contaminades.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Novament, es requereix personal per a ser operades i el cost d'inversió, de reposició de membranes i de consumibles de neteja, així com el consum elèctric dependrà de les aigües a tractar.

És habitual veure sistemes on es realitza una preconcentració amb un sistema d'ultrafiltració, el permeat de la qual és enviat a un sistema d'osmosi inversa per acabar-lo de refinar i amb l'objectiu d'obtenir un resultat amb un menor percentatge d'impureses. ^{1,6,7}

Alguns exemples de contaminants eliminables per un sistema d'osmosi inversa són els sucres, els pesticides, els herbicides i els ions Na^+ , Ca^{2+} , OH^- i Cl^- entre d'altres. ⁴

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un sistema d'osmosi inversa són principalment **els sòlids dissolts, la densitat i la viscositat** de l'aigua a tractar.



Il·lustració 6: Sistema de filtració per Osmosi inversa

La valoració del percentatge d'aigua a tractar que es pot admetre en l'etapa d'evaporació i cristallització és molt important, després de la descripció de les tecnologies concentradores.

3.2.6 Sistemes d'evaporació al buit (EVAP)

Existeixen diferents models d'evaporadors al buit (il·lustració 7) per a la gestió d'aigües residuals, però per a la realització de l'estudi que es presenta en el treball, s'ha definit un sistema de compressió mecànica de vapor (de l'anglès, *Mechanical Vapor Compression MVC*), per ser l'equip alimentat elèctricament més eficient i amb major capacitat de depuració. Es basa principalment en l'evaporació d'aigua sotmesa a una depressió i per tant, amb un punt d'ebullició inferior als 100°C , obtenint, per una banda, aigua destil·lada i per l'altra, un producte concentrat. ⁷

Els principals avantatges són que, juntament amb els sistemes de cristallització, són els sistemes més robustos, permeten arribar a alts graus de concentració i tractar grans quantitats d'aigua, amb sòlids en suspensió, sòlids dissolts, olis i tensioactius entre d'altres sense la necessitat de personal operant la planta i amb un cost de consumibles de neteja molt reduïts.



Il·lustració 7: Evaporador

Els principals inconvenients són els alts costos d'inversió i l'elevat consum elèctric, motiu pel qual es recomana realitzar una preconcentració amb altres tecnologies per abaratir el cost total de gestió de l'aigua residual. Tot i que permeten treballar amb sòlids en suspensió (sempre que tinguin una mida inferior a $100\ \mu\text{m}$) es recomana la seva eliminació prèvia per tal de millorar



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

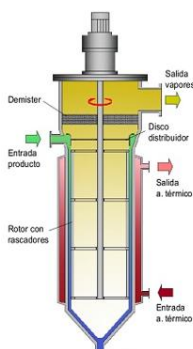
l'eficiència i els períodes de neteja del sistema o que en cas de contenir-ne, sigui en un percentatge inferior als 1.000 ppm. El grau de concentració al que es pot arribar dependrà dels sòlids dissolts, sent el limitant, el punt en què qualsevol d'ells comenci a precipitar i l'augment del punt ebullicoscòpic, que s'ha de mantenir per sota dels 4°C.⁷

La qualitat de l'aigua destil·lada obtinguda, dependrà de la composició de l'aigua d'entrada. En cas de contenir elements volàtils amb un punt d'ebullició inferior al de l'aigua, es trobaran dissolts en el destil·lat i serà necessari un post tractament per eliminar-los; en cas contrari, el resultat serà aigua desmineralitzada.

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un evaporador al buit són principalment els **sòlids en suspensió, els sòlids dissolts, els olis i greixos, la densitat, la viscositat, les sals dissoltes i la seva solubilitat i l'augment del punt ebullicoscòpic** de l'aigua a tractar.

3.2.7 Sistemes de cristallització per evaporació al buit

Tot i que també existeixen diferents models de cristallitzadors (il·lustració 8) per a la gestió d'aigües residuals, per a la realització de l'estudi mostrat en el treball, s'ha definit un sistema de cristallització per evaporació al buit i alimentat elèctricament amb un sistema frigorífic. Es basa novament en l'evaporació d'aigua sotmesa a una depressió, però amb el gran avantatge que la seva morfologia permet evaporar aigües amb pràcticament qualsevol composició i obtenir un producte totalment sec (o viscos en funció de la composició química).⁷



Il·lustració 8:
Cristallitzador

El principal inconvenient és que tenen un consum elèctric de l'ordre de sis vegades superior als evaporadors i el seu cost d'inversió en funció del volum d'aigua tractada també es veu incrementat.

La seva capacitat de producció també està limitada i en moltes ocasions és necessari disposar diversos equips en paral·lel.

Els paràmetres analítics a considerar per a l'estudi d'un cristallitzador són principalment els **sòlids en suspensió, els sòlids dissolts, els olis i greixos, la densitat, la viscositat, la seva solubilitat de les sals dissoltes i l'augment del punt ebullicoscòpic** de l'aigua a tractar.

A manera de resum i per tal de determinar la millor combinació de processos a implementar en funció dels valors analítics obtinguts s'ha realitzat la següent taula:

TECNOLOGIA	PARÀMETRES ANALÍTICS A ANALITZAR	CONTAMINANTS SEPARABLES	COST DE GESTIÓ TOTAL
Bassa de decantació	Sòlids en suspensió Olis i greixos Densitat	Sòlids en suspensió, Olis i greixos	0,1 €/m ³



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Tanc d'homogeneïtzació	-	-	0 €/m ³
Decanter	Sòlids en suspensió Densitat	Sòlids en suspensió	2,93 €/m ³
DAF	Sòlids en suspensió Densitat	Sòlids en suspensió	1,49 €/m ³
Ultrafiltració	Sòlids en suspensió Sòlids dissolts Densitat Viscositat	Sòlids en suspensió i sòlids dissolts	1,26 €/m ³
Osmosi inversa	Sòlids dissolts Densitat Viscositat	Sòlids dissolts	1,56 €/m ³
Evaporador	Sòlids en suspensió, Sòlids dissolts Olis i greixos Densitat Viscositat Solubilitat salts dissoltes Augment del punt ebullescòpic	Sòlids en suspensió, sòlids dissolts, olis i greixos	3,84 €/m ³
Cristallitzador	Sòlids en suspensió Sòlids dissolts Olis i greixos Densitat Viscositat Solubilitat salts dissoltes Augment del punt ebullescòpic	Sòlids en suspensió, sòlids dissolts, olis i greixos	23,45 €/m ³

Taula 1: Taula resum dels processos preconcentradors junt amb els costos de gestió i els contaminants separables

*El cost de gestió total €/m³ fa referència als euros que costa tractar cada m³ d'aigua residual a l'entrada de l'equip.

*El cost de gestió inclou el consum elèctric, el cost de consumibles d'operació i neteja i el cost de personal. Són valors proporcionats per propietaris d'equips, que poden tenir lleugeres variacions en funció de l'anàlisi de l'aigua, però es consideraran valors fixos, ja que el seu càlcul no entra dins de l'abast del treball.

*El cost d'inversió dels equips serà consultat a enginyeries quan s'hagin definit les diferents alternatives, amb l'objectiu de seleccionar l'opció més viable.



3.3 ANTECEDENTS BIBLIOGRÀFICS

La crisi hídrica global, l'esgotament de les matèries primeres, la contaminació ambiental, la producció d'energia i l'augment del consum energètic, són problemes greus que la societat ha de resoldre i superar per tal de mantenir i augmentar la qualitat de la nostra vida. D'aquesta manera, ha sorgit una tecnologia necessària per afrontar els problemes interconnectats: la descàrrega zero de líquids (ZLD).⁸

La descàrrega zero de líquids (ZLD) és una solució per aigües altament contaminades o molt complicades de tractar, com és el cas de la indústria minera, ja que els efluentes de la mineria sense processar són àcids i extremadament salins i, en concret, solen contenir una gran quantitat de sediments. Les plantes de ZLD utilitzen tecnologies de tractament d'efluents, com poden ser membranes d'ultrafiltració o sistemes de filtració per osmosi inversa, entre d'altres descrits prèviament a l'apartat 3.2, transformant aquests efluentes en aigües d'alta qualitat i/o adequades per aplicacions com el regadiu de paisatges, la reutilització en processos industrials i/o la producció de diferents tipus de sals com a subproductes, ja que eliminen l'excés de sals i minerals presents en el producte inicial. Per tant, la base de ZLD és la reutilització de l'aigua en la seva totalitat per diverses aplicacions posteriors. S'ha experimentat un creixement de la seva popularitat gràcies a la qualitat de l'aigua recuperada, perquè aquesta compleix estàndards estrictes regulats, a l'augment del cost de l'aigua dolça i a la tendència de disminuir el subministrament d'aigua en l'àmbit mundial. A més, és una tecnologia competitiva atès el menor impacte ambiental que presenta.^{1,6,7}

En les últimes dècades, les operacions amb membranes ja han tingut un paper clau en sistemes de recuperació d'aigua i sembla ser l'avenç més eminent en els últims anys. Com a exemple, en la indústria de dessalinització. Ghaffour et al.⁸, va informar que la capacitat total de dessalinització global era de 66,4 milions de m³/dia el 2013 i s'esperava arribar a 100 milions de m³/dia abans del 2015. Amb tot això, la separació per membranes demostra ser una de les metodologies més efectives pel tractament efectiu de l'efluent de residus abocat per diverses indústries.⁸ Cal destacar que el 60% de l'aigua dessalinitzada és produïda per la tecnologia d'osmosi inversa, encara que el principal inconvenient, i és pel qual s'han d'afegir altres elements, és que deixen un rebuig molt elevat, i per tant, en cap moment s'elimina el problema. Malgrat l'enorme èxit de la tecnologia utilitzada per ZLD, encara es requereixen millores en termes de cost d'aigua, major productivitat, és a dir, augmentar el factor de concentració de l'aigua d'entrada al procés, i una millora eco/sostenible. A més a més, sembla que, en aquest tipus de sistema preconcentrador la qüestió crítica en la qual s'està treballant és en la destrucció de les membranes causades per la deposició dins o sobre l'estructura, la qual cosa provoca un augment de resistències hidràuliques, costos operatius i de manteniment, i deteriorament de productivitat i qualitat del producte.⁸

Pel que fa als evaporadors, en concret amb la tecnologia de compressió mecànica de vapor (MVC) s'ha aconseguit l'evaporació de l'aigua en un rang d'entre 1 – 1200 m³/dia. Són uns equips molt potents i robustos i s'espera arribar a unes millores més importants en relació amb els cabals a tractar i amb el cost energètic; per tant, s'espera un desenvolupament molt positiu per afrontar la crisi hídrica enfront de la tecnologia de ZLD.^{7,9}



4. MARC EXPERIMENTAL

Per tal de poder definir els paràmetres esmentats en el marc teòric, amb mostres d'aigües de diferents procedències industrials, es van determinar, a escala de laboratori i es justifiquen de forma teòrica, els valors obtinguts de les següents propietats i característiques de cadascuna de les aigües analitzades. Finalment, es va realitzar, per unes aigües en concret, la determinació quantitativa i/o qualitativa de cada paràmetre descrit i prèviament explicat per tal de concloure quin seria el tractament de ZLD més viable d'aquestes.

4.1 Viscositat

Els fluids tenen una sèrie de propietats que depenen de les molècules que els constitueixen. Una d'aquestes propietats és la viscositat, que es pot definir com l'arrossegament intern d'un fluid al desplaçar-se. La viscositat és un terme que s'utilitza per descriure la resistència al moviment relatiu que presenten dues capes adjacents del fluid i és causada per les forces d'atracció entre les molècules i el líquid. Els fluids amb alta viscositat ofereixen certa resistència a fluir, mentre que aquells que presenten una viscositat baixa, flueixen amb facilitat. ¹⁰

Per tal de fer la determinació de la viscositat d'un líquid s'ha utilitzat un viscosímetre rotacional (RTV), en concret, el model NDJ-1 de la marca *BAOSHISHAN*, que consta d'un cilindre rotacional coaxial que mesura la viscositat mitjançant un rotor.

4.1.1 Descripció de l'assaig realitzat

En primer lloc, es prepara el líquid que es vol mesurar en un vas de precipitats de vidre amb un diàmetre no inferior a 70 mm i una altura no inferior a 130 mm. A continuació, es col·loca el viscosímetre rotacional a sobre d'una superfície plana ajustant el nivell de bombolla. Es caragola el rotor que utilitzarem i se submergeix dins del fluid. En segon lloc, s'escull la velocitat en rpm, manualment, es connecta la font d'alimentació i s'encén l'equip. Es treballa en condicions normals de pressió i temperatura ($T=25^{\circ}\text{C}$ i $P=1$ atm).

Les dades es poden mostrar aproximadament en 20 – 30 segons, quan el punter s'estabilitza. En aquest moment, per obtenir la lectura de les dades, s'ha de prémer el botó situat a la part inferior i desconnectar la font d'alimentació.

Cal destacar que prèviament s'ha d'estimar aproximadament l'interval de viscositat basant-se en la viscositat de l'aigua a T^{a} ambient ($8,55 \cdot 10^{-4}$ mPa · s) ¹¹, per tal de fer la selecció del rotor i de la velocitat. Si no es pot estimar la viscositat del líquid, s'ha d'agafar un valor alt per la mesura real. En general, s'ha d'utilitzar un rotor més petit i una velocitat més lenta quan la viscositat és elevada, mentre que per una viscositat més baixa, s'ha d'usar un rotor més gran i se li ha de proporcionar més velocitat.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

S'ha realitzat l'assaig amb dues mostres d'aigua. La primera va ser aigua destil·lada (A) (il·lustració 9) mentre que la segona prové d'una indústria que s'encarrega de la regeneració d'olis industrials usats (B) (il·lustració 10).

En ambdós casos, per realitzar l'assaig, s'ha utilitzat el rotor número 1 i una velocitat de 60 revolucions per minut (rpm).



Il·lustració 9: Mesura de viscositat de l'aigua destil·lada (A)



Il·lustració 10: Mesura de viscositat de l'aigua amb olis (B)

A continuació, s'ha realitzat el mateix assaig amb els fluids a una $T=94^{\circ}\text{C}$.

4.2 Densitat

La densitat d'un cos es defineix com la relació entre la seva massa i el seu volum:

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Les unitats de la densitat en el sistema internacional són Kg/m^3 .

Per tal de quantificar la densitat d'un líquid, es pot utilitzar el mètode de la proveta o el mètode del picnòmetre. En aquest cas, per tal de determinar-la s'ha escollit el primer. ¹⁰

4.2.1 Descripció de l'assaig realitzat

Es pesa una proveta de 50 ml neta i seca en el granetari (M_1). A continuació s'omple la proveta del líquid problema. I finalment es pesa la proveta plena de la mostra d'aigua residual en qüestió (M_2). Es realitza l'assaig en condicions normals de temperatura i pressió.

$$\text{Densitat del líquid problema} = \frac{(M_2 - M_1)}{V} \quad (2)$$

El líquid problema que s'ha utilitzat per fer la determinació, en primer lloc, ha sigut una aigua residual procedent de la indústria de processament d'olis i lubricants (A) (il·lustracions 11 i 12).



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

En segon lloc, s'ha determinat la densitat d'una mostra d'aigua residual procedent de la mina de Riotinto, seguint el mateix procediment (B) (il·lustracions 11 i 13).

1.



Il·lustració 11: Mesura de la proveta buida i seca

2.



Il·lustració 12: Mesura de la proveta amb l'aigua residual amb presència d'olis (A)

3.



Il·lustració 13: Mesura de la proveta amb l'aigua residual de mineria de Riotinto (B)

4.3 Sòlids totals (TS)

Per tal de fer un diagnòstic correcte de l'aigua, és necessari quantificar els sòlids totals que conté la mostra, que són els residus que queden en la fracció sòlida del recipient després d'evaporar i portar a sequedat el producte inicial en una estufa a escala de laboratori. Els residus poden ser tant sals inorgàniques, com és el cas dels carbonats, bicarbonats, clorurs, sulfats, fosfats i nitrats de sodi, potassi, calci, magnesi i ferro, com matèria orgànica.¹² Els sòlids totals són la suma del total de sòlids dissolts i del total dels sòlids en suspensió presents en l'aigua residual.

Per tal de mostrar l'assaig realitzat per quantificar els sòlids totals, s'han escollit, en primer lloc, aigües residuals d'una planta de biogàs (A) (il·lustracions 14, 15, 16 i 17).

En segon lloc, s'ha repetit l'anàlisi per quantificar els sòlids totals amb una mostra d'aigua d'una empresa de la indústria alimentària (B) (il·lustracions 18, 19, 20 i 21).

4.3.1 Reactius utilitzats

4.3.1.1 Oli de silicona

Aspecte	Líquid oliós incolor
Olor	Inodor
Punt de fusió / Punt de congelació	-50 °C
Punt / Interval d'ebullició	No determinat
Punt de centelleig	>200°C (ASTM D-92)
Autoinflamabilitat	No determinat
Solubilitat en aigua	Insoluble
Densitat	0,967 – 0,975 g/cm ³ a 25°C
Valor pH	No aplicable
Viscositat	Aproximadament 350 cSt a 25°C

Taula 2: Propietats físiques i químiques de l'oli de silicona¹³



Les unitats de viscositat són els *centistokes* (cSt).

4.3.2 Manipulació i emmagatzematge

Cal mantenir ben tancats els envasos per evitar esquitxades o vessaments. Cal evitar la formació de boira i vapors. No està permès menjar, beure o fumar en el lloc de treball.

Es recomana emmagatzemar-lo en el seu envàs original, tapat i mantenir ben tancats els envasos per evitar la seva contaminació.

4.3.3 Descripció de l'assaig realitzat

L'assaig es va realitzar amb una aigua residual aportada per la propietat procedent d'un sistema industrial. Aquesta, se sotmet a un procés d'evaporació en el rotavapor amb l'objectiu de portar el producte a sequedat.

L'evaporació al buit és un sistema de concentració de dissolucions aquoses procedents de diferents processos industrials. La funció principal de l'evaporador és concentrar un residu fins pràcticament el punt de saturació i en alguns casos, com és aquest, arribar fins a l'obtenció d'un residu sec.

El fet de disminuir el punt ebulloscòpic, no només permet evaporar sense un cost energètic molt elevat sinó que, a més, l'aigua destil·lada es recupera amb una qualitat immillorable i en la major part dels casos, és reutilitzable en altres aplicacions.

Per tant, en aquest cas, s'evaporen 500 mL en un rotavapor amb unes condicions de pressió i temperatura del bany d'1 atm i 110°C respectivament, ja que per simular les condicions necessàries perquè es doni el procés d'evaporació hi ha d'haver un intercanvi de calor d'almenys 10°C entre el bany d'oli de silicona i l'aigua residual a tractar en el matràs de fons rodó, i una rotació de 110 rpm.

1.



Il·lustració 14: Mostra d'aigua de biogàs (A) amb la qual s'ha realitzat l'anàlisi

2.



Il·lustració 15: Pesada de la mostra al granetari



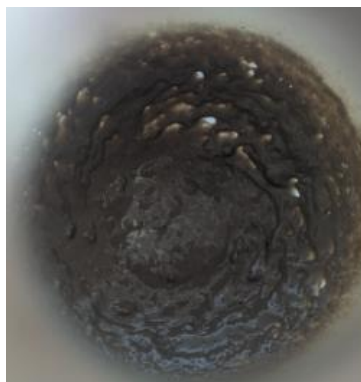
Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

3.



Il·lustració 16: Evaporació de la mostra d'aigua fins a residu sec

4.



Il·lustració 17: Resultat de l'evaporació

1.



Il·lustració 18: Mostra d'aigua de la (B) amb la qual s'ha realitzat l'anàlisi

2.



Il·lustració 19: Pesada de la mostra al granetari

3.



Il·lustració 20: Evaporació de la mostra d'aigua fins a residu sec

4.



Il·lustració 21: Mostra de residu sòlid



4.3.A Sòlids totals dissolts (TDS)

Els sòlids totals dissolts són molècules i ions que es troben dissolts en les aigües. Estan constituïts per substàncies orgàniques i inorgàniques, ja sigui en forma molecular, en forma iònica, tal com he comentat anteriorment, o fins i tot en forma microgranular. Un factor important que cal destacar és que la concentració d'aquests sòlids dissolts ve determinada per la presència de minerals i metalls pel que fa a compostos inorgànics, i de gasos que es formen per reaccions de descomposició de la matèria orgànica i compostos químics que donen olor, color i toxicitat presents a les mostres d'aigua residual.¹⁴

El primer pas és determinar qualitativament si hi ha presència de sòlids dissolts (il·lustració 22). En el cas que n'hi hagi, per tal de quantificar quins són, es porta la mostra d'aigua residual problema a un laboratori extern, per tal d'obtenir una analítica completa dels compostos dissolts.

A continuació, s'han determinat els sòlids dissolts per les mateixes mostres d'aigua residual amb les que s'han quantificat prèviament els sòlids totals (Apartat 4.3) amb un tester per determinar la qualitat de l'aigua, el model *EZ-9909SP*, de la marca *NOYafa*.



Il·lustració 22: Quantificació del percentatge de sòlids dissolts presents en les mostres d'aigües residuals

4.3.B Sòlids totals en suspensió (TSS)

Els sòlids totals en suspensió estan constituïts per sòlids sedimentables¹, sòlids en suspensió i sòlids col·loïdals². Pel que fa a la composició, estan formats per partícules orgàniques, com poden ser sòlids biològics, algues o bacteris, i per partícules inorgàniques, com poden ser sals, sorra o argila, immiscibles en l'aigua, que es mantenen dispersos en l'aigua i no sedimenten per gravetat quan l'aigua es troba en repòs. Són partícules fàcilment separables del líquid per sedimentació, filtració o centrifugació.

¹ Els sòlids sedimentables són les partícules que es poden trobar en aigües residuals i que, degut al seu pes i a la seva densitat, tendeixen a depositar-se al fons de l'aigua.

² Els sòlids col·loïdals són partícules de diàmetre d'entre 10^{-9} – 10^{-5} m que per sedimentar s'han d'agrupar en partícules majors.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Per tal de fer la seva determinació, com que hem quantificat prèviament els sòlids totals i el total de sòlids dissolts presents en la mostra d'aigua, es poden conèixer els sòlids totals en suspensió:

$$TSS = TS - TDS \quad (3)$$

4.4 Conductivitat elèctrica (CE)

La conductivitat elèctrica és un factor rellevant pel disseny d'evaporadors, ja que ens indica la concentració de sals solubles presents en la solució del substrat.

La conductivitat elèctrica és la mesura de la capacitat d'un material per conduir el corrent elèctric. Per tant, la concentració de sals és directament proporcional al valor de conductivitat elèctrica. ¹⁵



A continuació, es va realitzar un assaig a escala de laboratori amb aigües de diferent procedència per avaluar el paràmetre en qüestió.

La conductivitat elèctrica es va mesurar amb un conductímetre, *Greisinger 1400 Serie*, en condicions normals de pressió i temperatura. En primer lloc, es van escollir unes aigües de procedència minera, en concret, aigües de drenatge de les mines de Riotinto (il·lustració 23).

Il·lustració 23: Mostra d'aigua residual de procedència de les mines de Riotinto

En segon lloc, es van escollir unes aigües provinents del sector de la perfumeria, cosmètica i farmàcia, per repetir l'assaig (il·lustració 24).



Il·lustració 24: Mostra d'aigua residual de procedència del sector de la perfumeria, cosmètica i farmàcia.



Il·lustració 25: Conductímetre emprat



4.5 Augment ebullescòpic

Les propietats de les dissolucions es classifiquen en dos grans grups: propietats constitutives i col·ligatives²². Aquestes últimes són les que depenen del nombre de partícules dissoltes en una quantitat fixa de dissolvent, és a dir, depenen de la concentració de partícules del solut i no de la seva naturalesa o mida. Entre aquestes es troben la pressió de vapor, la pressió osmòtica, el punt de fusió i el punt d'ebullició.

La pressió de vapor, que és una propietat que presenten les dissolucions quan s'evapora el líquid ja que algunes de les molècules existents en la seva superfície adquireixen l'energia necessària per passar de la fase líquida a la fase gasosa, sorgeix quan s'arriba a un equilibri entre el líquid i el vapor, pel fet que aquest últim exerceix aquesta determinada pressió de vapor.

La disminució de la pressió de vapor repercuteix en el punt d'ebullició, ja que l'augmenta, generant el que es coneix com: augment ebullescòpic. Si un dissolvent líquid conté un solut no volàtil dissolt, la seva pressió de vapor disminueix, i, en conseqüència, necessitarà major temperatura per aconseguir la pressió de vapor que necessita per l'ebullició.¹⁶

L'augment del punt ebullescòpic, ΔT_e , depèn de la concentració i de la naturalesa del solut.

4.5.1 Descripció de l'assaig realitzat

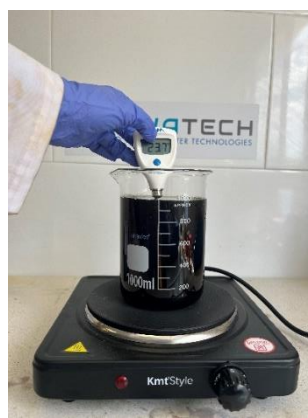
Es va realitzar el següent assaig per concloure si hi va haver augment del punt ebullescòpic en dues mostres de diferent procedència industrial.

En primer lloc, amb una mostra d'aigua d'origen d'una planta de biogàs (A) (il·lustració 26), i, en segon lloc, amb una mostra d'aigua del sector de la regeneració d'olis i lubricants (B) (il·lustració 27).

Es mesura 1 L de la mostra problema en un vas de precipitats, es va ajustar a sobre d'una placa calefactors perquè s'escalfi i amb un termòmetre es fan diverses mesures de la temperatura, a mesura que l'aigua s'evapora, a pressió atmosfèrica, i es concentra fins a portar el residu a la concentració a la qual es treballarà en l'evaporador.



Il·lustració 26: Anàlisi de l'augment ebullescòpic d'una mostra d'aigua residual de la mostra A.



Il·lustració 27: Anàlisi de l'augment ebullescòpic d'una mostra d'aigua residual de la mostra B.



4.6 Olis i greixos

Alguns dels contaminants que provoquen més problemes en el tractament d'aigües residuals són els olis i els greixos. La seva presència, no només provoca problemes en el tractament dels efluents industrials sinó que també dona lloc a la contaminació del sòl i els recipients en els quals l'aigua és descarregada. A més a més, han contribuït a l'esgotament de l'aigua potable, ja que la majoria de les indústries els requereixen per la realització dels seus processos.

Els greixos, que són compostos orgànics que es componen de carboni, hidrogen i oxigen, sent la font més concentrada d'energia en els aliments, pertanyen al grup de les substàncies anomenades lípids i provenen en forma líquida o sòlida.

Tots són combinacions d'àcids grassos saturats i no saturats. Els olis, que són productes altament estables, immiscibles amb l'aigua, procedeixen majoritàriament de la descomposició de matèria orgànica (degradació d'aliments), a excepció dels olis minerals, els quals provenen d'altres activitats. A conseqüència de la seva immiscibilitat, romanen en la superfície donant lloc a l'aparició d'escumes i nates, les quals causen problemes en qualsevol classe de tractament biològic o fisico-químic.¹⁷



La determinació qualitativa d'aquests compostos en les aigües residuals és important i per tant, a continuació, es va escollir una aigua del sector industrial del vidre per visualitzar-ne un exemple (il·lustració 28).

Il·lustració 28: Exemple de capa superior d'olis i greixos



5. CAS PRÀCTIC REAL

Les aigües residuals que s'utilitzen per a fer la determinació dels paràmetres fisico-químics, procedeixen de la indústria de colorants, blanquejants òptics i auxiliars, i del sector del paper, tèxtil i cuir (Mostra C).

5.1 Viscositat



Es determina la viscositat de la mostra d'aigua (il·lustració 29) seguint el mateix procediment que s'explica a l'apartat 4.1.1, però amb un pas previ d'escalfament fins a una temperatura de 94°C amb una placa calefactora per tal de simular l'assaig industrialment, ja que un evaporador, amb una tecnologia de compressió mecànica de vapor, que és l'equip que s'ha definit (Apartat 3.2.6), treballa a aquesta determinada temperatura.

Il·lustració 29: Mesura de la viscositat

5.2 Densitat

Es determina la densitat (il·lustracions 31 i 32) seguint el mateix procediment que s'explica a l'apartat 4.2.1, però amb un previ pas d'escalfament fins a una temperatura de 94°C (il·lustració 30).

1.



Il·lustració 30: Preescalfament

2.



Il·lustració 31: Mesura de M_1

3.



Il·lustració 32: Mesura de M_2



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

5.3 Sòlids totals (TS)

Es determinen els sòlids totals seguint el mateix procediment que s'explica a l'apartat 4.3.3

1.



Il·lustració 33: Mostra d'aigua problema

2.



Il·lustració 34: Pesada al granetari

3.



Il·lustració 35: Evaporació fins a residu sec

4.



5.



Il·lustració 36, 37: Resultat del procés

5.3.A Sòlids dissolts (TDS)

Es determinen els sòlids dissolts (il·lustració 38) seguint el mateix procediment explicat a l'apartat 4.3.A, amb un previ pas d'escalfament fins a arribar a una temperatura de 94°C.



Il·lustració 38: Mesura de TDS



5.3.A.1 Solubilitat de les sals

La solubilitat és la capacitat màxima d'una substància, anomenada solut, per dissoldre's en una altra, anomenada solvent o dissolvent, en determinades condicions.

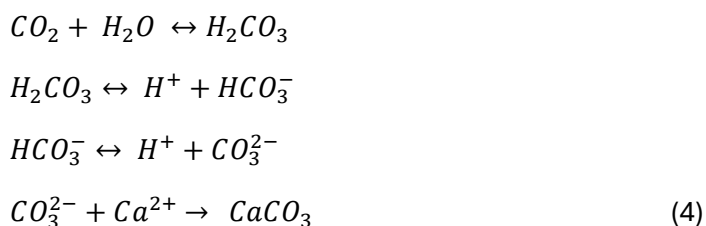
Les sals més importants que poden precipitar i que poden generar una problemàtica en quant a incrustacions són: el clorur de sodi (NaCl), el carbonat de calci (CaCO₃) i el sulfat de calci (CaSO₄).

La solubilitat dels minerals presenta una dependència respecte a la temperatura i la pressió, sent la primera variable la que exerceix una major influència. Generalment, la temperatura és directament proporcional a la solubilitat de les sals, com és el cas de les sals de clorur (il·lustració 39) i sals de nitrat, encara que per sals com són CaCO₃ i CaSO₄ · 2H₂O, la tendència és inversa.

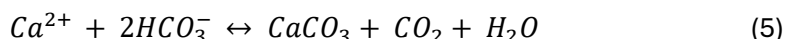
a) Carbonat de calci (CaCO₃)

El carbonat de calci és un compost molt insoluble que es forma per la precipitació de l'ió carbonat, CO₃²⁻, en presència de l'ió Ca²⁺. Els equilibris de dissociació són els següents:

18,19



L'augment de la temperatura i la disminució de la pressió afavoreixen les incrustacions del carbonat de calci, pel fet que disminueix la solubilitat del diòxid de carboni CO₂, alliberant-se de la dissolució. A més, un augment del pH afavoreix la precipitació del CaCO₃:²⁰



Aquest fenomen s'explica segons la llei de Le Chatelier. Si el diòxid de carboni s'allibera, la concentració en la dissolució disminueix i en conseqüència, es produeix un augment de la concentració del CaCO₃ i desplaçant la reacció per mantenir constant la K_{eq} :

$$K_{eq} = \frac{[CaCO_3][CO_2]}{[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2} \quad (6)$$

Es considera l'aigua com un element constant, per tal es pot menysprear en l'equació.

b) Sulfat de calci dihidratat (CaSO₄ · 2H₂O)

El sulfat de calci és una sal ternària de calci, d'un metall alcalinoterri, amb sofre i oxigen, que es forma per precipitació de l'ió sulfat, SO₄²⁻, en presència de l'ió Ca²⁺, un ió que és altament propens a coordinar-se.

La reacció global és la següent:





Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

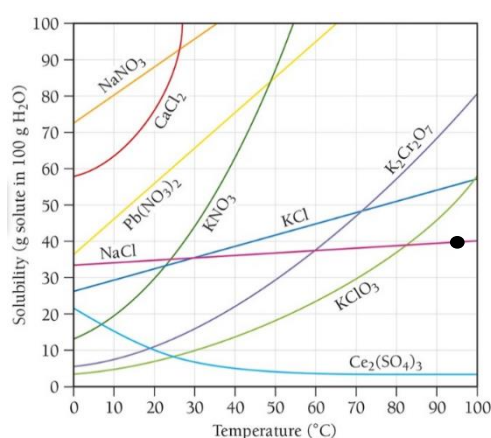
La dissolució del sulfat càlcic en aigua és exotèrmica, s'allibera calor, ($\Delta H < 0$), de tal manera que, segons el principi de Le Chatelier, si el sistema es refreda, l'equilibri de la dissolució evolucionarà cap a la formació de productes, de tal manera que el sulfat de calci es dissoldrà més fàcilment.

Per tant, en augmentar la temperatura, la solubilitat en disminueix. ²¹

La baixa solubilitat és la responsable de la precipitació de la sal en la zona més calenta del sistema, formant incrustacions importants.

c) Clorur de sodi (NaCl)

Els clorurs són anions que acostumen a formar sals més solubles, i observant la corba de solubilitat del clorur de sodi en la il·lustració 39, es conclou que la solubilitat augmenta amb la temperatura.



Il·lustració 39: Corba de solubilitat de NaCl en aigua en funció de la Temperatura

5.4 Conductivitat

Es determina la conductivitat de les aigües problema (il·lustració 40) seguint el mateix procediment explicat a l'apartat 4.4 amb un pas previ d'escalfament de la mostra fins a 94°C.



Il·lustració 40: Mesura de la conductivitat



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - “Zero Liquid Discharge (ZLD)”

5.5 Augment ebulioscòpic

En primera instància, es determina l'augment del punt ebulioscòpic (il·lustració 41) seguint el procediment de l'apartat 4.5.1.



Il·lustració 41: Determinació de l'augment ebulioscòpic

5.6 Olis i greixos

No es detecten en aquesta mostra.



6. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A continuació, es plasmen els resultats dels diferents assaigs realitzats en el marc experimental per tal de justificar els valors de forma teòrica. A banda, s'estudia la influència d'aquests en el tractament dels efluent residuals amb la tecnologia del ZLD.

6.1 Viscositat

Per concloure amb els resultats de l'assaig realitzat a l'apartat 4.1.1, s'ha considerat que:

$$\eta = K \cdot A \quad (8)$$

η = viscositat absoluta ($mPa \cdot s$)

K = coeficient

A = Valor de lectura (angle de deflexió)

Per tal de determinar el coeficient en la següent taula, s'ha d'establir la velocitat (rpm) i el rotor utilitzat.

Rotor \ Rpm	60	30	12	6
1	1	2	5	10
2	5	10	25	50
3	20	40	100	200
4	100	200	500	1000

Taula 3: Taula de coeficients extreta del manual d'instruccions

El coeficient és 1 per ambdues mostres, doncs es va treballar amb el rotor 1 i a 60 rpm. Per tant:

Viscositat $\left(\frac{Kg}{m \cdot s}\right) = (Pa \cdot s)$

Mostra A	T (°C) ambient	$8,2 \cdot 10^{-4}$
	T = 94 °C	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Mostra B	T (°C) ambient	$1,07 \cdot 10^{-3}$
	T = 94 °C	$3,5 \cdot 10^{-4}$

Taula 4: Resultats en unitats del SI dels valors de viscositat

La viscositat està directament relacionada amb la composició química i presenta una forta dependència amb la temperatura. El seu comportament segueix la llei d'Arrhenius en la que s'observa que en augmentar la temperatura, augmenta la seva velocitat (Equació 9).²²

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (9)$$

k = constant de velocitat

A = freqüència

E_a = energia d'activació ($J \cdot mol^{-1}$)

R = constant universal dels gasos ($8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

T = temperatura (K)



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Cal destacar que quan augmenta la temperatura de qualsevol substància (especialment líquida o gasosa) les seves molècules adquireixen major mobilitat i la seva cohesió disminueix i en conseqüència, l'acció de les forces intermoleculares. Per aquest motiu, la viscositat varia amb la temperatura, augmentant quan baixa i disminuint quan s'incrementa. En els líquids, la dependència de la viscositat dinàmica amb la pressió és molt petita i, per tant, pot considerar-se que depèn únicament de la temperatura. ²²

6.1.1 Importància de la viscositat

La determinació de la viscositat és essencial per la tria de la bomba per als següents sistemes de ZLD: ultrafiltració (3.2.4), osmosi inversa (3.2.5) i evaporador al buit (3.2.6), en aquest últim, en concret, per la mida de l'intercanviador de calor. Com més disminueixi aquest, més augmentarà la superfície d'intercanvi i, en conseqüència, el consum de la bomba.

Aquesta inferència es pot examinar en els següents gràfics, generats amb el sistema de selecció d'una bomba anomenat: "Salvatore Robuschi, Pompe Parma". ²³

El gràfic 1 estudia, en funció del cabal (eix de les abscisses), a quina pressió (eix de les ordenades) ha de treballar la bomba, mentre que el gràfic 2, amb informació complementària, determina el consum d'aquesta bomba, en funció de les variables escollides anteriorment.

La línia negra AØ350 representa un tipus de bomba en concret, amb una viscositat absoluta d'1 centistokes (cSt), mentre que la línia vermella, AØ350 representa el mateix tipus de bomba, amb un augment considerable de viscositat, únicament com a variable modificable. Es generen dos gràfics amb les següents variables (il·lustració 42):

EDITABLE PUMP DATA

Diameter:	<input type="text" value="359 mm"/>
H:	<input type="text" value="12.33"/> m
Q:	<input type="text" value="602.05"/> m ³ /h
RPM:	<input type="text" value="980"/> rpm
Viscosity:	<input type="text" value="250"/> cSt
Spec. Gravity:	<input type="text" value="1"/>
Editing Field:	<input type="text" value="Change Vis..."/> ▾
<input type="button" value="Calculate"/>	

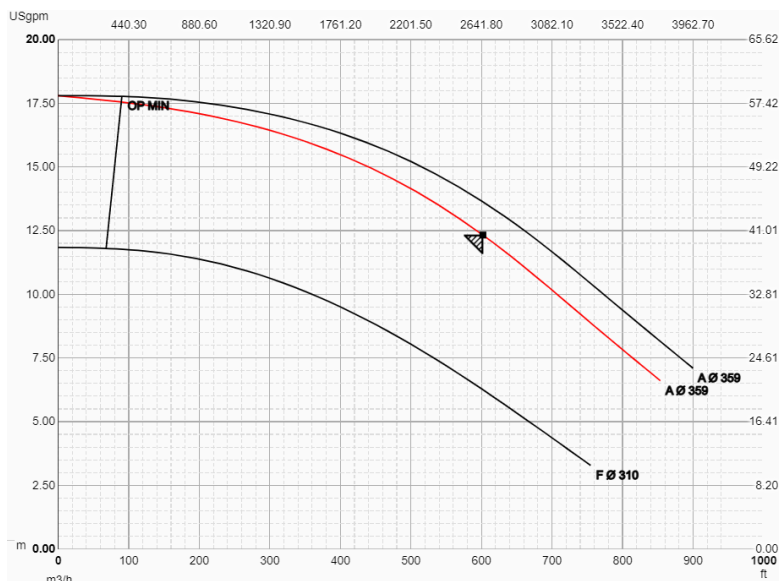
Il·lustració 42: Variables usades per generar els gràfics 1 i 2

Es conclou que la viscositat és un factor determinant pel rendiment de la bomba, ja que, com més pressió requereixi, menys cabal haurà de tindre l'efluent (Gràfic 1).

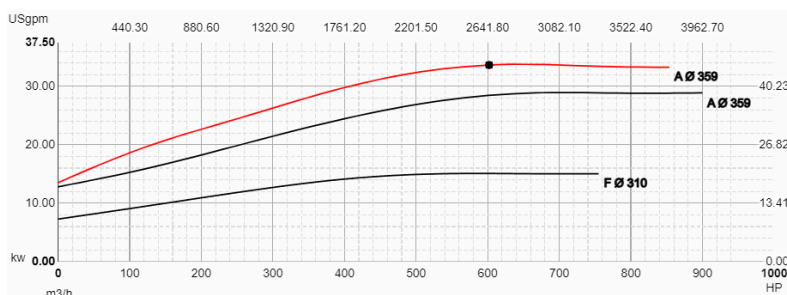
Més endavant, com més augmenta la viscositat més consum es generarà pel mateix tipus de bomba (Gràfic 2).



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"



Gràfic 1: Gràfic que determina l'anàlisi del rendiment de la bomba en funció de la viscositat



Gràfic 2: Gràfic que determina el consum de la bomba influït per la viscositat

6.2 Densitat:

Considerant que $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3$ i en funció de l'equació 2, s'han determinat els següents resultats de densitat de l'assaig realitzat a l'apartat 4.2.1 en unitats del SI ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$):

	Variables	Mesures experimentals	Resultats
Mostra A	M_1	69,7 g	1036
	M_2	121,5 g	
	Volum	50 mL	
Mostra B	M_1	69,7 g	1170
	M_2	128,2 g	
	Volum	50 mL	

Taula 5: Mesures experimentals i resultats dels valors de densitat



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

La densitat, que és una variable intensiva³ i física, és la constant de proporcionalitat entre massa i volum, dues propietats extensives⁴. Es relaciona directament amb la massa, establint una relació absoluta, per un mateix volum: a major massa, major densitat. Per tant, en comparar dues substàncies, la que és més densa és la que pesa més per unitat de volum, com és el cas.

Per una altra banda, a massa constant, la densitat és inversament proporcional al volum. Les dues substàncies diferents poden tindre un pes igualitari, encara que, la que ocupi un menor volum, presentarà una major densitat.²⁴

6.2.1 Importància de la densitat

La densitat és un paràmetre substancial com la viscositat, per la tria de la bomba en els següents sistemes de ZLD: ultrafiltració (3.2.4), osmosi inversa (3.2.5) i evaporador al buit (3.2.6).

A partir de les variables proposades en la il·lustració 43, es generen 2 gràfics (Gràfics 3 i 4) amb informació complementària, en funció de la densitat, ja que és l'únic paràmetre que es pot modificar. El gràfic 3 estudia la variació de la pressió que cal que adquireixi un tipus de bomba determinada per un cabal en concret, mentre que, el gràfic 4 avalua el consum generat en funció dels factors prèviament escollits.

Pel mateix tipus de bomba, Aø350, es pot veure en el gràfic 3 només hi ha una línia. Aquest fet indica que un augment de la densitat no intervé en el rendiment de la bomba de l'equip. Pel contrari, pel mateix tipus de bomba, Aø350, es pot veure en el gràfic 4 una línia vermella i una negra. Aquest succés implica una relació directament proporcional de l'augment de la densitat amb el consum de la bomba.

Es conclou que, com més densitat presenti l'efluent a tractar, més consum generarà la bomba, encara que aquest paràmetre no influeix en el rendiment de la bomba.

EDITABLE PUMP DATA	
Diameter:	359 mm
H:	13.63 m
Q:	602.05 m3/h
RPM:	980 rpm
Viscosity:	1 cSt
Spec. Gravity:	1.5
Editing Field:	Changing Specific Gr... ▼
<input type="button" value="Calculate"/>	

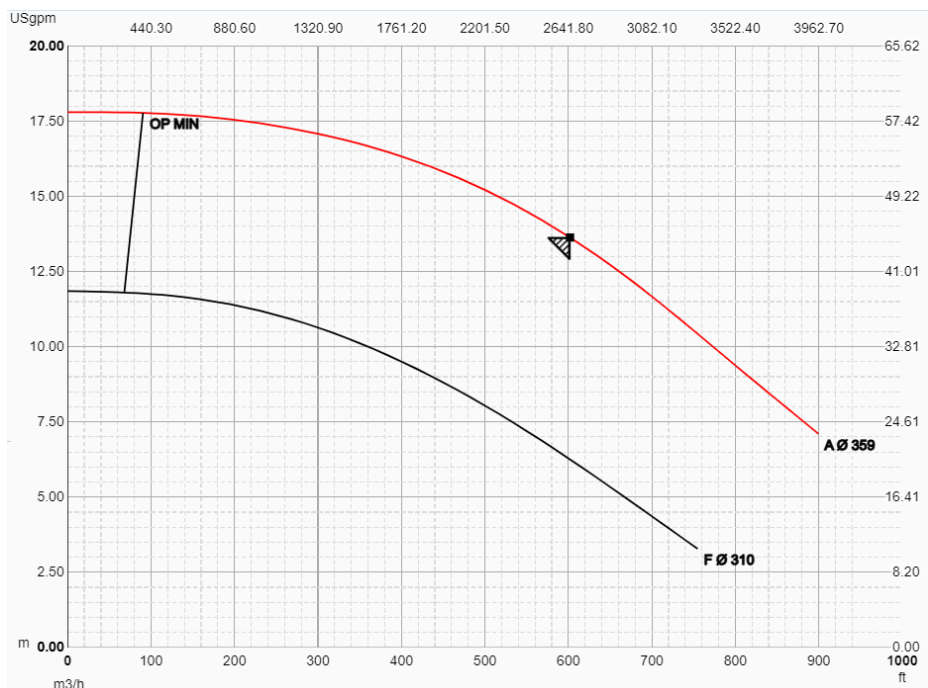
Il·lustració 43: Variables usades per generar els gràfics 3 i 4

³ Propietat que no depèn de la quantitat de matèria que posseeix un cos.

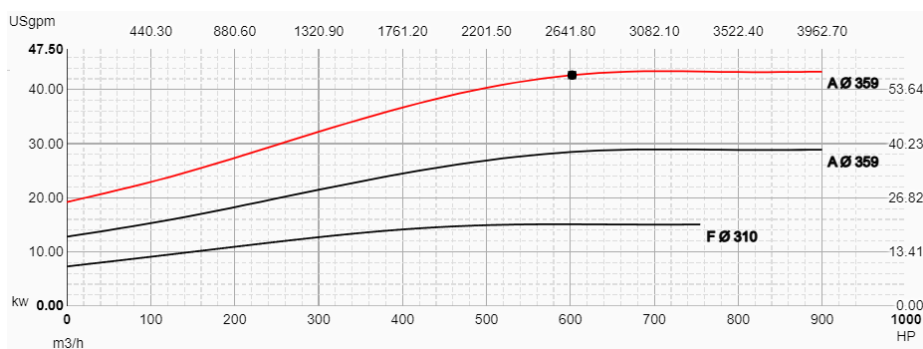
⁴ Propietat que depèn de la massa que s'estudia. Són magnituds les quals el seu valor és directament proporcional a la mida del sistema que es descriu.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"



Gràfic 3: Gràfic que determina l'anàlisi del rendiment d'una bomba en funció de la densitat



Gràfic 4: Gràfic que determina el consum de la bomba influït per la densitat

6.3 Sòlids totals (TS)

Mesures experimentals de massa (en g) que cal considerar per arribar al resultat:

Matràs de fons rodó buit	512,6
--------------------------	-------

Mesures experimentals de l'assaig realitzat a l'apartat 4.3.3:

Mostra A	Pre-evaporació	Massa 1	494,20
	Post-evaporació	Massa 2	15,04
Mostra B	Pre-evaporació	Massa 1	482,50
	Post-evaporació	Massa 2	10,13

Taula 6: Mesures experimentals



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Càlculs i resultats:

Mostra A	$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100$	$\frac{15,04}{494,20} \cdot 100 = 3,0\%$
Mostra B	$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100$	$\frac{10,13}{482,50} \cdot 100 = 2,1\%$

Taula 7: Càlculs i resultats de TS

Els sòlids totals provenen de tota mena de processos com per exemple, de l'escorrentia agrícola, ja que normalment conté fertilitzants i partícules en el sòl suspeses, de subproductes de plantes de tractament d'aigua, de restes industrials, de la descomposició de matèria animal i vegetal, entre d'altres. D'aquesta manera la quantitat de TS presents en una mostra d'aigua industrial, ve determinada tant per la concentració de sals dissoltes, com per les partícules sòlides visibles en suspensió acumulades en les diferents operacions en cada procés.

El control dels sòlids totals és fonamental en el tractament d'aigües residuals. La mesura i el control d'aquests, és essencial per mantenir l'eficiència dels diferents processos de tractament en tota classe de sectors industrials i per evitar la corrosió.

6.3.1 Sòlids totals dissolts (TDS)

El resultat de l'assaig realitzat a l'apartat 4.3.A és el següent:

	TDS
Mostra A	0,86%
Mostra B	1,5%

Taula 8: Resultats de TDS

Els sòlids dissolts, en primer lloc, indiquen la quantitat de minerals, metalls i sals dissoltes en l'aigua, principalment sals de calci, de magnesi, de potassi, de sodi, bicarbonats, clorurs i sulfats²⁵, de tal manera que la suma d'aquests components és major en la mostra B. En segon lloc, les sals presents en una mostra d'aigua marquen el punt màxim en què es podrà concentrar un producte inicial, en funció del punt de saturació d'aquestes.

En un sistema de ZLD és important la determinació qualitativa i quantitativa de TDS, així com la determinació de les molècules o ions presents per tal de saber la quantitat màxima d'aigua que es pot evaporar sense que es doni la precipitació de les substàncies dissoltes.



6.3.2 Sòlids totals en suspensió (TSS)

En funció de l'equació 3, el resultat de l'assaig realitzat a l'apartat 4.3.B és el següent:

	TSS
Mostra A	2,1%
Mostra B	0,6%

Taula 9: Resultats de TSS

La quantitat de sòlids en suspensió (que són els que tenen una mida superior a 10 µm) tant siguin d'origen mineral, d'origen orgànic i/o microorganismes, com són els bacteris, el plàncton, les algues i els virus, estan estretament relacionats amb la terbolesa, que és una mesura òptica, i el color de la mostra d'aigua.²⁶ Una variació del percentatge de TSS en les aigües residuals és una característica intrínseca de cada operació realitzada en els diferents processos.

Quantificar el percentatge total de TSS en la mostra d'aigua residual és essencial per escollir el sistema de ZLD i per dimensionar diferents equips com és el cas de la bassa o tanc de decantació (3.2.1), ja que l'ús de tancs de decantació per a l'eliminació de sòlids en suspensió en percentatges inferiors a l'1% no és justificable, del *decanter* (3.2.2), ja que per a justificar la instal·lació d'un *decanter*, el percentatge de sòlids en suspensió ha de ser superior al 5%, o del DAF (3.2.3), entre d'altres, descrits prèviament a l'apartat 3.2.

6.4 Conductivitat elèctrica

Els resultats realitzats a l'assaig 4.4 són els següents:

	Unitats	
Mostra A	µS/cm	$8 \cdot 10^3$
Mostra B		$1,2 \cdot 10^5$

Taula 10: Resultats de conductivitat elèctrica

La conductivitat elèctrica és una mesura indirecta de la concentració de sals, de tal manera que en la mostra B hi ha una elevada quantitat de sals, tal com s'observa a la taula 10. Aquestes sals estan directament relacionades amb els TDS presents, de tal manera que els TDS també són una mesura indirecta de la conductivitat elèctrica d'una mostra d'aigua residual industrial.

La conductivitat de corrent elèctric a l'aigua s'explica mitjançant la teoria de la dissociació electrolítica. Aquesta estableix que quan es dissol un electròlit en aigua, una part considerable es dissocia espontàniament en ions positius i negatius: ²⁷

$$MA = M^+ + A^- \quad (10)$$

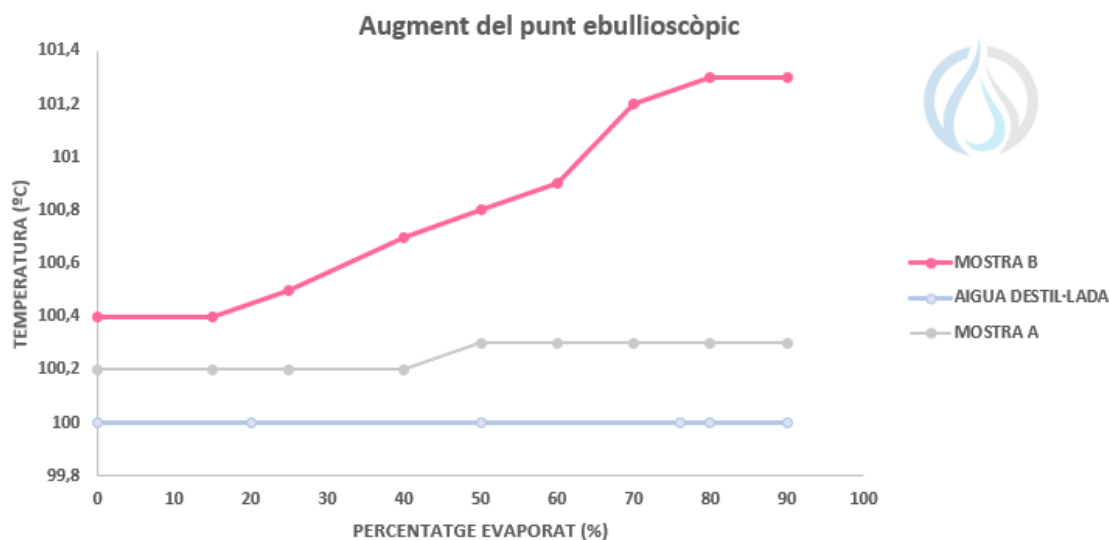
La proporció de molècules que es dissocien depèn bàsicament de la concentració de la dissolució. En dissolucions diluïdes la totalitat de l'electròlit està en forma iònica, mentre que en dissolucions poc diluïdes ens trobem el cas contrari.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Per tant, es pot dir que la conductivitat elèctrica en una dissolució electrolítica ve determinada pel grau de dissociació de les molècules, és a dir, pel nombre de partícules amb càrrega elèctrica per unitat de volum de la solució.

6.5 Augment ebullioscòpic



Gràfic 5: Determinació de l'augment del punt ebullioscòpic a pressió atmosfèrica

L'augment ebullioscòpic ve determinat per la composició de les substàncies dissoltes en cada mostra d'aigua residual industrial. Quan un solut no volàtil es dissol en un dissolvent, el punt d'ebullició de la solució és sempre més elevat en comparació al del dissolvent pur ²⁸.

Els factors que influeixen en l'augment de la temperatura d'ebullició són els següents: ¹⁶

- Naturalesa del solut:** Si el solut en qüestió es dissocia en ions, com és el cas de les sals inorgàniques, augmentarà el nombre total de partícules en la dissolució i, en conseqüència, incrementarà el punt d'ebullició considerablement equiparant-lo amb solucions amb soluts que no es dissocien.
- Concentració del solut:** Per una banda, per una dissolució amb un solut no volàtil, a mesura que el dissolvent s'evapora, la concentració del solut augmenta, ja que queda en solució, provocant un augment progressiu del punt d'ebullició. Per una altra banda, per una dissolució amb soluts volàtils, aquests s'evaporen amb l'aigua, de tal manera que la concentració no augmenta i, en conseqüència, tampoc el punt d'ebullició de la solució.

En conclusió, hi ha hagut un important augment del punt ebullioscòpic en la mostra B i pel contrari, no n'hi ha hagut a la mostra A, tal com s'observa al gràfic 5. Aquest fet és degut al fet que la mostra A és una dissolució amb soluts volàtils o sense cap solut significatiu que no provoca aquest augment de la temperatura a mesura que s'evapora el dissolvent. Pel contrari, la mostra B és una dissolució d'unes aigües amb un solut no volàtil que es dissocia



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

en ions, augmentant notablement el punt d'ebullició de la solució a mesura que es concentra.

6.5.1 Importància de l'augment ebullioscòpic

L'augment del punt ebullioscòpic té una gran influència en el consum d'un sistema d'evaporació per compressió mecànica de vapor. Tot i que l'estudi dels principis de funcionament d'aquests equips no entra dins de l'abast del projecte, és important conèixer els valors limitants i determinants per al seu disseny amb l'objectiu de realitzar una caracterització de les aigües adient.

Un equip de MVC que treballa a una temperatura d'ebullició de, per exemple, 94°C i amb un fluid que no experimenta cap augment del seu punt ebullioscòpic a mesura que es concentra, genera vapor saturat a 94°C, que posteriorment serà introduït a un compressor on s'augmentarà la seva pressió i conseqüentment la seva temperatura fins als 100°C per a poder dur a terme el cicle de funcionament típic d'aquests sistemes ⁷ (Taula 11).

Si per contra, es disposa d'un equip de compressió mecànica de vapor que treballa novament a una temperatura d'ebullició de 94°C, però amb un fluid que un cop concentrat, té un augment del punt ebullioscòpic de 4°C, els vapors generats es trobaran a una temperatura de 94°C, però la seva temperatura de saturació serà de 90°C (Taula 12).

Per tant, analitzant les taules de consums dels compressors utilitzats en aquestes aplicacions, es pot observar que hi ha una gran diferència entre ambdós casos (taula 11 i taula 12):

Operational Point		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Fan No.		Fan 1	Fan 1	Fan 1	Fan 1	Fan 1
Mass flow	kg/h	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Volume flow	m ³ /s	1.64	1.58	1.53	1.48	1.42
Inlet pressure	mbar	702	729	757	785	815
Real suction temperature	°C	90.0	91.0	92.0	93.0	94.0
Suction temperature, saturated	°C	90.0	91.0	92.0	93.0	94.0
Suction temperature overheated	°C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Density at operation	kg/m ³	0.424	0.439	0.455	0.471	0.488
Density overheated	kg/m ³	0.424	0.439	0.455	0.471	0.488
Density with water	kg/m ³	0.435	0.450	0.464	0.480	0.495
Discharge pressure	mbar	1 014	1 014	1 014	1 014	1 014
Discharge temperature saturated	°C	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Discharge temperature overheated	°C	130.0	127.3	123.2	120.7	116.8
Temperature difference	K	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0
Fan pressure	kPa	31.10	28.41	25.63	22.76	19.80
Dynamical pressure difference	mbar	-1.33	-1.16	-1.01	-0.86	-0.73
Internal efficiency grade	%	81	81	81	81	81
Mass of injected water (@T≥T2s)	kg/h	68	62	53	47	38
Shaft power	kW	54.7	49.0	43.2	37.6	32.1
Shaft power incl. water inj.	kW	56.2	50.2	44.1	38.3	32.6
Fan speed	rpm	10 436	9 892	9 313	8 717	8 079
Shut off speed	rpm	10 743	10 743	10 743	10 743	10 743
Impeller dimensioning temperature	°C	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
Moment of inertia	kgm ²	1	1	1	1	1
Power density	kWm ² (kPa) ^{1/2}	820	663	521	399	293
φ / φ opt		0.93	0.95	0.97	1.00	1.04

Taula 11: Consum dels compressors sense augment del punt ebullioscòpic



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Operational Point		Case I16	Case I17	Case I18	Case I19	Case I20
Fan No.		Fan 1	Fan 1	Fan 1	Fan 1	Fan 1
Mass flow	kg/h	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500
Volume flow	m ³ /s	1.65	1.60	1.54	1.66	1.60
Inlet pressure	mbar	702	729	757	702	729
Real suction temperature	°C	93.0	94.0	95.0	94.0	95.0
Suction temperature, saturated	°C	90.0	91.0	92.0	90.0	91.0
Suction temperature overheated	°C	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0
Density at operation	kg/m ³	0.420	0.435	0.451	0.419	0.434
Density overheated	kg/m ³	0.420	0.435	0.451	0.419	0.434
Density with water	kg/m ³	0.433	0.447	0.462	0.432	0.446
Discharge pressure	mbar	1 014	1 014	1 014	1 014	1 014
Discharge temperature saturated	°C	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Discharge temperature overheated	°C	134.8	130.5	127.9	135.3	131.1
Temperature difference	K	10.0	9.0	8.0	10.0	9.0
Fan pressure	kPa	31.10	28.41	25.63	31.10	28.41
Dynamical pressure difference	mbar	-1.32	-1.17	-1.01	-1.33	-1.18
Internal efficiency grade	%	81	81	81	81	81
Mass of injected water (@T≥T2s)	kg/h	78	69	63	79	70
Shaft power	kW	55.3	49.4	43.7	55.4	49.5
Shaft power incl. water inj.	kW	57.0	50.8	44.8	57.2	50.9
Fan speed	rpm	10 495	9 937	9 366	10 507	9 948
Shut off speed	rpm	10 743	10 743	10 743	10 743	10 743
Impeller dimensioning temperature	°C	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
Moment of inertia	kgm ²	1	1	1	1	1
Power density	kWm ² (kPa) ^{1/2}	837	674	532	839	676
φ / φ opt		0.93	0.95	0.97	0.93	0.95

Taula 12: Consum dels compressors amb augment del punt ebullicoscòpic



7. RESULTATS MOSTRA C

Viscositat

En l'assaig realitzat a l'apartat 5.1, es va treballar amb el rotor 1 i a 60 rpm i doncs en funció de l'equació 8, el resultat de la viscositat de la mostra C és el següent:

	Unitats	Resultats	Límit màxim permès per poder tractar l'aigua en un evaporador
Viscositat	$\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}\right) = (\text{Pa}\cdot\text{s})$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Taula 13: Resultat de viscositat

En funció de la viscositat, la mostra C és una aigua residual industrial que es pot ser tractada en un evaporador.

Densitat

Considerant que $1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3$ i en funció de l'equació 2, s'han determinat els següents resultats de densitat de l'assaig realitzat a l'apartat 5.2 en unitats del SI $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$:

	Incògnites	Mesures	Resultat	Límit màxim permès per poder tractar l'aigua en un evaporador
Densitat	M_1	69,7 g	1004	1500
	M_2	119,9 g		
	Volum	50 mL		

Taula 14: Mesures experimentals i resultats de la densitat

En funció de la densitat, la mostra C és una aigua residual industrial que es pot ser tractada en un evaporador.

Sòlids Totals (TS)

Matràs de fons rodó buit	512,6 g
--------------------------	---------

Mesures experimentals:

Mostra C	Pre-evaporació	Massa 1	636,90 g
	Post-evaporació	Massa 2	22,14 g

Taula 15: Mesures dels sòlids totals (TS)



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Càlculs i resultats:

Mostra C	$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100$	$\frac{22,14}{636,90} \cdot 100 = 3,5\%$
-----------------	-----------------------------	--

Taula 16: Càlculs i resultats dels sòlids

Sòlids totals dissolts (TDS) i Sòlids totals en suspensió (TSS)

Resultats:

	TDS	TSS
Mostra C	2,7%	0,8%

Taula 17: Resultats dels TDS i TSS

Aquestes aigües residuals industrials poden evaporar el 88% de l'aigua ja que és el punt en el que els sòlids dissolts precipiten. De tal manera que quedarà un 12% de fracció sòlida.

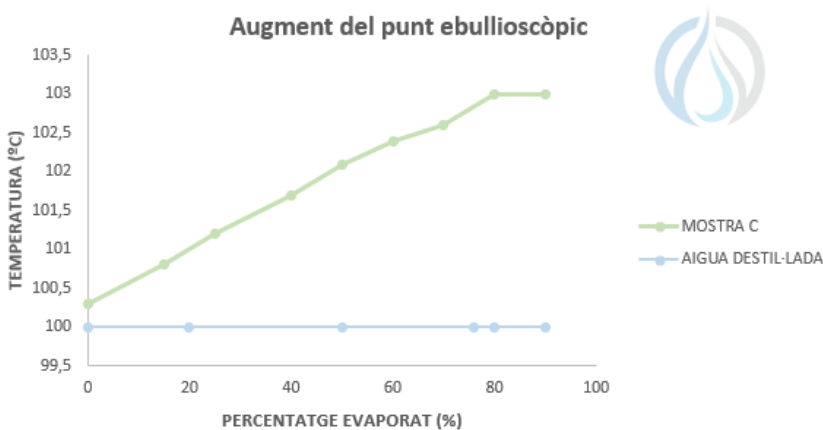
Conductivitat elèctrica

Unitats

Mostra C	$\mu\text{S/cm}$	$5,1 \cdot 10^4$
-----------------	------------------	------------------

Taula 18: Resultats de conductivitat

Augment del punt ebullicoscòpic



Gràfic 6: Determinació de l'augment del punt ebullicoscòpic a pressió atmosfèrica

L'augment del punt ebullicoscòpic ha sigut de 2,7°C, tal com s'observa al gràfic 6.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

8. ANÀLISI ECONÒMIC DE LES DIFERENTS CONFIGURACIONS PROPOSADES DE SISTEMES "ZERO LIQUID DISCHARGE"

Amb els valors analitzats a l'apartat anterior i partint de l'anàlisi, es definirà la necessitat d'introduir, o no, les tecnologies estudiades en el treball, en un sistema ZLD.

BASSA O TANC DE DECANTACIÓ

Com que no s'ha detectat la presència d'olis i greixos a les aigües i el percentatge de sòlids en suspensió és inferior a l'1%, s'ha descartat la necessitat d'implementar una bassa de decantació. Tot i que el seu ús ens permet garantir una bona homogeneïtzació del producte, no té gaire sentit la seva implementació degut a la necessitat de disposar de l'espai necessari i al cost de la instal·lació.

L'ús d'un tanc que garanteixi una bona homogeneïtzació i que permeti decantar els pocs sòlids en suspensió que pugui contenir l'aigua, serà suficient.

DECANTER

Considerant que el percentatge de sòlids és inferior al 5% i tenint en compte l'alt cost d'inversió i operació de l'equip, no justifica la utilització d'un *decanter* en el sistema ZLD per al tractament de les aigües en qüestió.

DAF

Amb un percentatge de TSS del 0,8% i tenint en compte que en aquesta situació l'aigua només necessita un petit clarificat, l'ús d'un DAF teòricament permetrà eliminar-los i millorarà el rendiment dels equips posteriors, en referència principalment als períodes de neteja. S'ha de valorar però si el cost d'inversió i operació justifica aquestes millores.

ULTRAFILTRACIÓ (UF) I OSMOSI INVERSA (RO)

S'ha contactat amb un proveïdor de membranes per a sistemes de filtració i se li ha facilitat la informació referent al percentatge de sòlids (amb DAF i sense) i l'anàlisi de les aigües per a determinar la viabilitat d'instal·lar un sistema d'ultrafiltració i/o osmosi inversa, així com les dades de densitat i viscositat calculades per a determinar el consum de l'equip.

Per part del proveïdor es va comunicar que el permeat d'una osmosi inversa compliria les condicions d'abocament de les aigües, però que requeriria una filtració prèvia amb una ultrafiltració per a millorar el rendiment del sistema. En aquest cas s'ha recomanat una ultrafiltració polimèrica a causa del seu baix cost d'operació, però es podria implementar també un sistema d'ultrafiltració tangencial ceràmica, amb un consum major, però més resistent a possibles atacs químics.

Els percentatges estimats de permeat i rebuig dels equips són els expressats a continuació:

- Ultrafiltració amb membranes polimèriques amb DAF (Opció 1)
 - o Permeat: 90,7%
 - o Rebuig: 9,3%
- Osmosi inversa amb DAF (Opció 1)
 - o Permeat: 60,0%



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

- Rebuig: 40,0%
- Ultrafiltració amb membranes polimèriques sense DAF (Opció 2)
 - Permeat: 90,0%
 - Rebuig: 10,0%
- Osmosi inversa sense DAF (Opció 2)
 - Permeat: 60,0%
 - Rebuig: 40,0%

Tot i que la implementació del DAF no tindrà pràcticament efectes sobre el rendiment de les membranes, sí que tindrà influència en els períodes de neteja; per tant, s'ha de considerar un augment del 20% dels costos operatius del sistema d'ultrafiltració.

EVAPORACIÓ AL BUIT

L'evaporador al buit és un dels elements indispensables en un sistema ZLD, ja que per molt que s'utilitzin sistemes de filtració per membranes, els rebuigs obtinguts estan en forma líquida i han de ser tractats. Els cristallitzadors també poden realitzar aquesta funció, però el seu alt cost d'operació fa que s'utilitzin com a complement per a gestionar els rebuigs de l'evaporador, molt inferiors als entregats pels sistemes de filtració per membranes.

L'aigua destil·lada obtinguda, a menys que contingui elements volàtils que evaporin juntament amb l'aigua, que no és el cas, és pràcticament pura, amb conductivitats inferiors als 50 μS i lliure de contaminants. Aquesta aigua compleix perfectament les especificacions pel seu abocament, però l'equip novament, entrega un percentatge d'aigua en forma rebuig. El rebuig dependrà de la concentració de l'aigua d'entrada i dels sistemes concentradors que s'instal·lin prèviament, ja que com s'ha comentat anteriorment, la limitació en l'evaporació ve marcada pel punt on comencen a precipitar les sals contingudes a l'aigua.

Els percentatges estimats tenint en compte el comportament observat al laboratori d'aigua evaporada i producte concentrat són els expressats a continuació:

- Amb ultrafiltració i osmosi prèvia i amb DAF (Opció 1, il·lustració 48)
 - Aigua evaporada: 94,4%
 - Concentrat: 5,6%
- Sense ultrafiltració i osmosi prèvia i sense DAF (Opció 3, il·lustració 50)
 - Aigua evaporada: 88,0%
 - Concentrat: 12,0%
- Amb ultrafiltració i osmosi prèvia i sense DAF (Opció 2, il·lustració 49)
 - Aigua evaporada: 94,4%
 - Concentrat: 5,6%
- Sense ultrafiltració i osmosi prèvia i amb DAF (Opció 4, il·lustració 51)
 - Aigua evaporada: 88,7%
 - Concentrat: 11,3%

Cal recordar que en cas de no haver eliminat prèviament els sòlids en suspensió, serà necessari instal·lar un filtre de 100 μm per a garantir la no presència de sòlids en suspensió de mida superior dins de l'evaporador.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

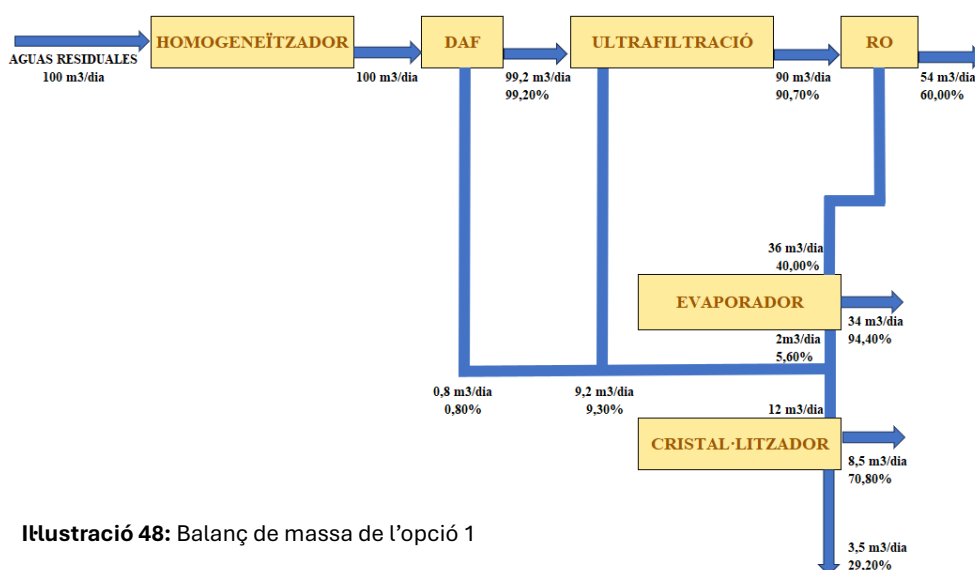
CRISTAL·LITZADOR

El cristallitzador és l'element que tanca el cercle en qualsevol sistema ZLD, ja que és l'únic sistema capaç d'obtenir aigua neta, per una banda i residu totalment sec per l'altre, el concepte que defineix un sistema de "Zero Liquid Discharge".

Per tant, no hi ha debat en la seva utilització ni en el cabal que haurà de tractar, un 12% respecte del producte total, que serà el punt on les sals presents a les aigües comencen a precipitar.

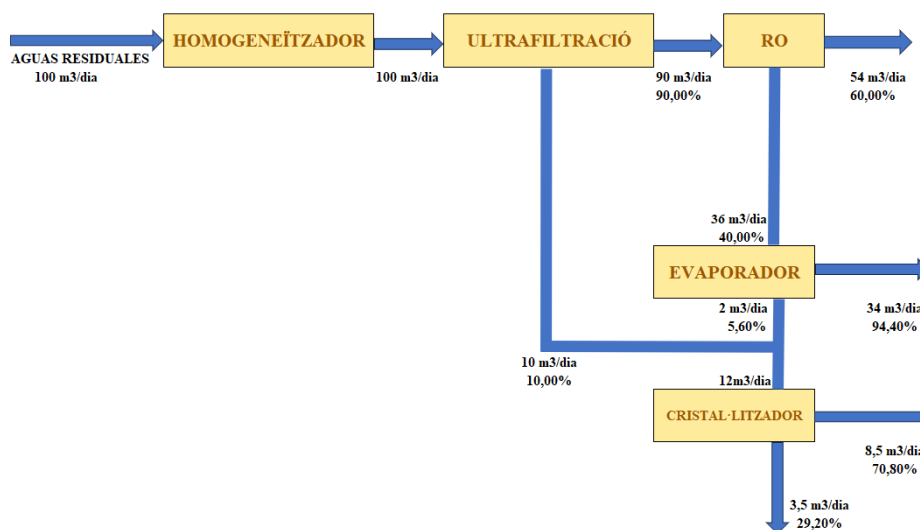
A continuació, es planteja un balanç de massa per cada opció proposada:

Opció 1: HOMO – DAF – UF – RO – EVAP – CRISTAL·LITZADOR



Il·lustració 48: Balanç de massa de l'opció 1

Opció 2: HOMO – UF – RO – EVAP – CRISTAL·LITZADOR

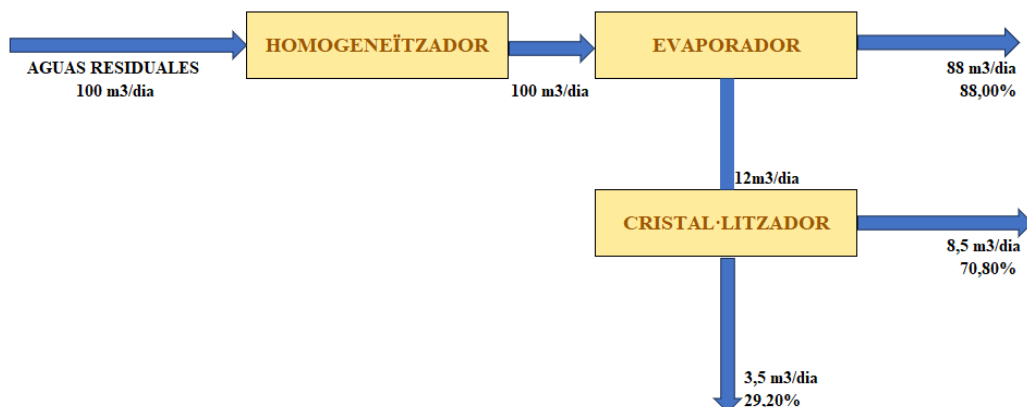


Il·lustració 49: Balanç de massa de l'opció 2



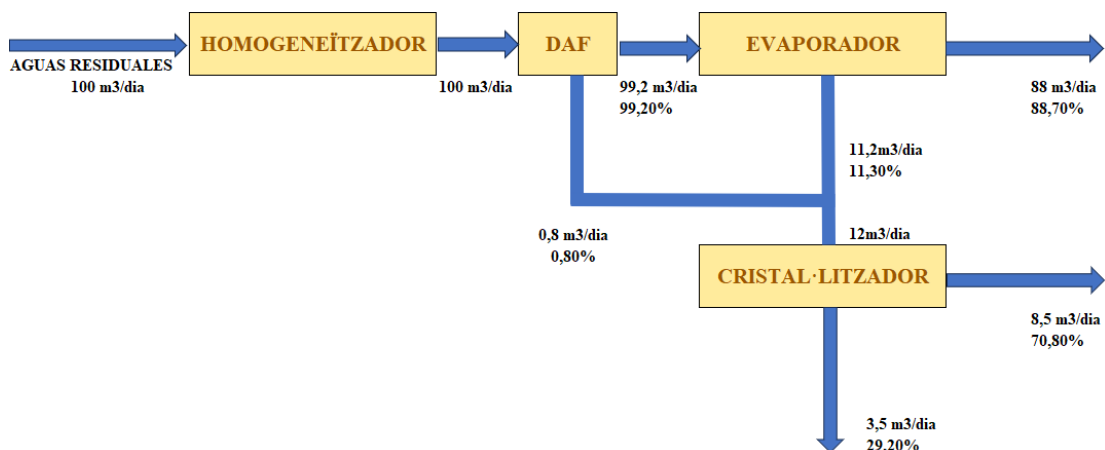
Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Opció 3: HOMO – EVAP – CRISTAL·LITZADOR



Il·lustració 50: Balanç de massa de l'opció 3

Opció 4: HOMO – DAF – EVAP – CRISTAL·LITZADOR



Il·lustració 51: Balanç de massa de l'opció 4



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

Seguidament, es determina el CAPEX i l'OPEX dels equips que concreten cadascuna de les opcions proposades. S'han utilitzat els valors de la taula 1 per tal de fer els càlculs pertinents en la taula 19.

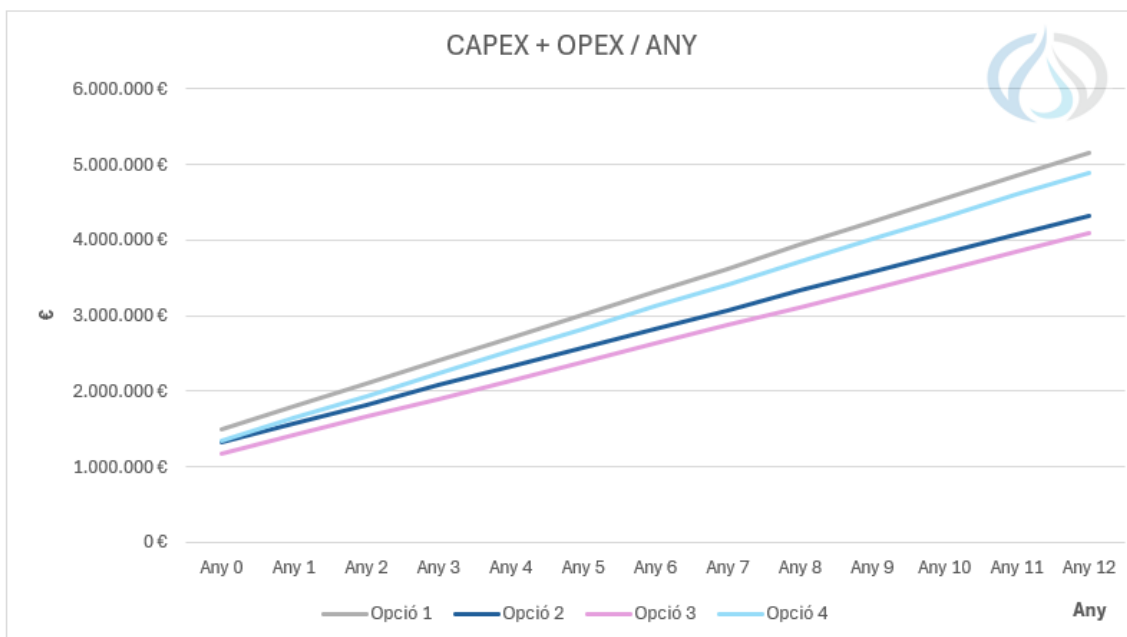
		Opció 1	Opció 2	Opció 3	Opció 4
HOMOGENEÏZADOR	CAPEX	22.000 €	22.000 €	22.000 €	22.000 €
	OPEX	0 €/dia	0 €/dia	0 €/dia	0 €/dia
DAF	CAPEX	172.000 €	-	-	172.000 €
	OPEX	149 €/dia	-	-	149 €/dia
ULTRAFILTRACIÓ	CAPEX	270.000 €	270.000 €	-	-
	OPEX	125 €/dia	126 €/dia	-	-
OSMOSI INVERSA	CAPEX	285.000 €	285.000 €	-	-
	OPEX	140,4 €/dia	140,4 €/dia	-	-
EVAPORADOR	CAPEX	512.000 €	512.000 €	915.000 €	915.000 €
	OPEX	138,24 €/dia	138,24 €/dia	384 €/dia	380,93 €/dia
CRISTALLITZADOR	CAPEX	236.000 €	236.000 €	236.000 €	236.000 €
	OPEX	281,4 €/dia	281,4 €/dia	281,4 €/dia	281,4 €/dia
TOTAL	CAPEX	1.497.000 €	1.325.000 €	1.173.000 €	1.345.000 €
	OPEX	834,04 €/dia	686,04 €/dia	665,4 €/dia	811,33 €/dia

Taula 19: CAPEX i OPEX de cada opció proposada

Finalment, es presenta un gràfic (Gràfic 7) per visualitzar l'estudi econòmic i la rendibilitat del projecte, en funció de l'anàlisi del CAPEX i l'OPEX respecte els anys de funcionament de les diferents opcions proposades pel sistema de "Zero Liquid Discharge" de la mostra C.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"



Gràfic 7: CAPEX i OPEX de cada opció proposada respecte l'any

A l'any 0, per les 4 opcions, només apareix el *CAPEX*: la despesa en capital, és a dir, els diners que una empresa inverteix en béns de llarga duració, com és el cas de maquinària, vehicles, edificis, etc. A primera vista, l'opció 1, és un sistema en el qual la inversió inicial és relativament elevada en comparació a la resta de solucions proposades. Pel que fa a les opcions 2 i 4, aquest cost és pràcticament el mateix i primerament no es pot apreciar cap diferència. En últim lloc, l'opció 3, és la possibilitat amb un total inicial d'aproximadament d'un milió d'euros, i s'observa que és la més baixa de les quatre.

A mesura que passa el temps, a aquest *CAPEX* inicial s'afegeixen els costos operatius, l'*OPEX* ("Operating Expenses"), que és la quantitat de diners destinats a les funcions principals per poder fer funcionar el sistema, com pot ser la nòmina dels diferents treballadors, la matèria primera a adquirir, les neteges pertinents, manteniment, etc. Es percep una notable diferència entre l'opció 1 i l'opció 3 des de l'any 1, que és l'any en el qual es comencen a incloure els costos pertinents d'operació, fins a l'any 12, en aquest cas, descartant definitivament el sistema format per un homogeneïtzador, DAF, ultrafiltració per membrana, osmosi inversa, evaporador i cristallitzador.

Pel que fa a les opcions 2 i 4, a partir de l'any 5 es veu una important diferència en els costos dels quals l'empresa es farà càrrec, descartant definitivament l'opció d'un sistema amb homogeneïtzador, DAF, evaporador i cristallitzador, ja que els valors tendeixen a l'augment progressiu, apropant-se, al llarg dels anys, als costos generats pel sistema 1, exclòs anteriorment.

Finalment, s'observa clarament que el sistema de ZLD amb únicament, un homogeneïtzador, un evaporador i un cristallitzador és l'alternativa més econòmica perquè és l'opció que presenta el *CAPEX* inicial més baix, a més dels costos operacionals més baixos al llarg dels anys.



9. CONCLUSIONS

9.1 En català

L'aigua és essencial per la vida, per aquest motiu és molt important la investigació i recerca dels possibles diferents tractaments d'efluents residuals industrials per la seva recuperació i/o reutilització. D'aquesta manera sorgeix la tecnologia del ZLD. Per tal d'escollir els diferents sistemes i equips necessaris, cal realitzar una determinació prèvia d'uns paràmetres analítics per cada mostra d'interès.

En aquest cas, s'ha definit un procés rendible en funció dels valors i conclusions obtingudes de les diferents analítiques de les aigües a tractar (mostra C). Primerament, s'ha exclòs del sistema la bassa o tanc de decantació, ja que, la quantitat de sòlids en suspensió és inferior a un 1%. Encara que el coneixement d'altres paràmetres analítics, com la densitat, són útils, el més rellevant és el TSS, ja que marcarà la seva instal·lació. A continuació, a causa del mateix paràmetre, s'ha decidit la no implementació d'un *decanter* per dur a terme la separació de la fracció sòlida no dissolta, ja que, com que la quantitat de TSS és inferior a un 5%, no justifica la seva utilització. El percentatge total de sòlids en suspensió en una mostra d'aigua residual és una característica intrínseca de les operacions realitzades en cada procés industrial.

Seguidament, s'ha proposat un sistema de filtració per ultrafiltració i/o osmosi inversa per tal d'eliminar al màxim els sòlids dissolts presents. El control dels TDS és fonamental per evitar el possible rebliment de les membranes i la possible corrosió dels equips. A més, el permeat que surt de la membrana, és l'aigua de producte que va a parar a l'evaporador, per aquest motiu és essencial reduir el percentatge de sals dissoltes.

Posteriorment, es disposa d'un evaporador amb tecnologia MVC, un element indispensable en un sistema de ZLD. Per poder dimensionar-lo, s'han definit els següents paràmetres analítics i s'han arribat a les següents conclusions:

- En primer lloc, els valors de viscositat i densitat són adequats per l'entrada a l'equip.
- La viscositat és un factor determinant pel rendiment i pel consum de la bomba, mentre que la densitat només pel seu consum, seguint una tendència directament proporcional en els dos casos.
- En segon lloc, el percentatge màxim d'evaporació de les aigües sense que precipiti el CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i NaCl , és d'un 88%, enviant un 12% de fracció sòlida al cristallitzador.
- En tercer lloc, la mostra C és una dissolució amb soluts no volàtils, ja que el punt d'ebullició ha augmentat $2,7^\circ\text{C}$ a mesura que s'ha evaporat el dissolvent, augment la concentració de les sals dissoltes.
- Finalment, degut a l'inferior augment de 4°C del punt d'ebullició s'ha conclòs que són aigües adequades per l'entrada a l'evaporador.

En últim lloc, s'ha implantat un cristallitzador, per poder obtenir el residu totalment sec, per una banda, i aigua neta, per l'altra. En definitiva, de les quatre alternatives proposades, l'opció més econòmica és la 3, tant en inversió inicial de capital (CAPEX) com en els costos operacionals generats amb la implementació del sistema al llarg dels anys (OPEX).



9.2 En anglès

Water is essential for life; for this reason, the investigation and research of different treatments of industrial wastewater for its recovery and/or reuse is especially important. This is how the technology of ZLD (Zero Liquid Discharge) emerges. In order to choose the necessary systems and equipment, it is essential to perform a prior determination of analytical parameters for each sample of interest.

In this case, a cost-effective process has been defined based on the values and conclusions obtained from the different analyses of the water to be treated (sample C). Firstly, the settling pond or tank has been excluded from the system, as the amount of suspended solids is less than 1%. Although the knowledge of other analytical parameters, such as density, is useful, the most relevant is the TSS (Total Suspended Solids), as it will determine its installation. Next, due to the same parameter, it has been decided not to implement a decanter to carry out the separation of the non-dissolved solid fraction, as the amount of TSS is less than 5%, which does not justify its use. The total percentage of suspended solids in a wastewater sample is an intrinsic characteristic of the operations performed in each industrial process.

Then, a filtration system by ultrafiltration and/or reverse osmosis has been proposed to eliminate as much of the dissolved solids as possible. Controlling the TDS (Total Dissolved Solids) is essential to avoid potential membrane fouling and possible equipment corrosion. Moreover, the permeate coming out of the membrane is the product water that goes to the evaporator, so it is essential to reduce the percentage of dissolved salts.

Subsequently, an evaporator with MVC (Mechanical Vapor Compression) technology is available, an indispensable element in a ZLD system. To size it, the following analytical parameters have been defined, and the following conclusions have been reached:

- Firstly, the values of viscosity and density are suitable for entry into the equipment.
- Viscosity is a determining factor for pump performance and consumption, while density only affects consumption, following a directly proportional trend in both cases.
- Secondly, the maximum evaporation percentage of the waters without precipitating CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, and NaCl is 88%, sending 12% of the solid fraction to the crystallizer.
- Thirdly, sample C is a solution with non-volatile solutes, as the boiling point has increased by 2.7°C as the solvent has evaporated, increasing the concentration of dissolved salts.
- Finally, due to the lower increase of 4°C in the boiling point, it has been concluded that these waters are suitable for entry into the evaporator.

Lastly, a crystallizer has been implemented to obtain the completely dry residue on one hand, and clean water on the other. In conclusion, of the four proposed alternatives, the most economical option is number 3, both in terms of initial capital investment (CAPEX) and the operational costs generated with the system implementation over the years (OPEX).



10. BIBLIOGRAFIA

- (1) Cipolletta, G.; Lancioni, N.; Gıı Akyol, Ç.; Eusebi, A. L.; Fatone, F. Brine Treatment Technologies towards Minimum/Zero Liquid Discharge and Resource Recovery: State of the Art and Techno-Economic Assessment. *J. Environ. Manage.* **2021**, *300*, 113681. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113681>.
- (2) BOE-A-2023-628 Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-628 (accessed May 23, 2024).
- (3) Gil Rodríguez, M. Modelo dinámico del proceso secundario de depuración de aguas residuales urbanas. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería.* **1998**, *14*, 525-538.
- (4) Diferencias entre decantación y flotación.pdf - tecexsa. <https://www.yumpu.com/es/document/read/13015895/diferencias-entre-decantacion-y-flotacionpdf-tecexsa> (accessed April 29, 2024).
- (5) Panagopoulos, A. Techno-Economic Assessment of Zero Liquid Discharge (ZLD) Systems for Sustainable Treatment, Minimization and Valorization of Seawater Brine. *J. Environ. Manage.* **2022**, *306*, 114488. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114488>.
- (6) Kodialbail, V.; Discharge, S. S.-C. of Z. L. Concept of Zero Liquid Discharge—Present Scenario and New Opportunities for Economically Viable Solution. In *Concept of Zero Liquid Discharge*; Elsevier, 2023; pp 3-31.
- (7) Charisiadis, C. *Brine Zero Liquid Discharge (ZLD) Fundamentals and Design*; 2018. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/ZLD-booklet-for-Lenntech-site-min-L.pdf>.
- (8) Figoli, Alberto.; Criscuoli, Alessandra. *Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment*; Springer; 2017, Vol. 380.
- (9) Jaakkola, H. Cost Effective Evaporators for Desalination. *Desalination.* **1997**, *108* (1–3), 357–360. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00044-1).
- (10) Rodríguez Alonso, J. J. *Ensayos Físicos y Fisicoquímicos.*; Cano Pina; 2000; pp 169 – 192.
- (11) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. *Fundamentals of heat and mass transfer*; New York: Wiley, 1996; Vol. 6, pp 1019.
- (12) De, E.; Moringa, L. A.; El, E. N.; De, T.; Residuales, A.; Fernando Mera-Alegria, C.; Lieset Gutiérrez-Salamanca, M.; Montes-Rojas, C.; Pablo Paz-Concha, J. Efecto de la *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas residuales en el Cauca, Colombia. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.* **2016**, *14*, 100–109. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)100-109](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)100-109).
- (13) Roth, C. Ficha de Seguridad: Aceite de Silicona. www.carlroth.de (accessed May 20, 2024).
- (14) Campos Gómez, I. *Saneamiento Ambiental*. EUNED, 2000.



Limitants analítics en un procés de tractament d'aigües residuals en sistemes de descàrrega zero de líquids - "Zero Liquid Discharge (ZLD)"

- (15) Barbaro, L.; Karlanian, M.; Mata, D. *Importancia Del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*; Ediciones INTA; Instituto de Floricultura, 2018.
- (16) Gallego Picó, Alejandrina.; Garcinuño Martínez, R. M.; Morcillo Ortega, M. J.; Vázquez Segura, M. Angel. *Química Básica*; 2013, Vol. 459, pp 253.
- (17) Vidales Olivo, M.; Magallanes, L.; Yasabel, M.; Sandoval, C.; Gabriela, M. Extracción de grasas y aceites en los efluentes de una industria automotriz. *ConCiencia Tecnológica*. **2010**, 40, 29.
- (18) Civan, F. *Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation*, 4th ed.; Elsevier, 2023; pp 181 – 200. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03547-4>.
- (19) Patton Charles, C. *Applied water technologies*; Campbell Morgan, J., Campbell Petroleum Series; Norman, Oklahoma, 1986.
- (20) Dyer, S. J.; Graham, G. M. The Effect of Temperature and Pressure on Oilfield Scale Formation. *J. Pet. Sci. Eng.* **2002**, 35, 95–107. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(02\)00217-6](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(02)00217-6).
- (21) Hoang, T. A.; Ang, H. M.; Rohl, A. L. Effects of Temperature on the Scaling of Calcium Sulphate in Pipes. *Powder Technol.* **2007**, 179, 31–37. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2006.11.013>.
- (22) Gallego Picó, A.; Garcinuño Martínez, R. M.; Morcillo Ortega, M. J.; ProQuest. *Química Básica*.; UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2018; pp 237-463.
- (23) Salvatore Robuschi.
<https://a0knenmmb.accounts.ondemand.com/saml2/idp/sso/a0knenmmb.accounts.ondemand.com> (accessed May 29, 2024).
- (24) Raviolo, A. Densidad: Un concepto para razonar. *Novedades Educativas*. **2023**, 386, 26–29.
- (25) Sigler, A.; Bauder, J. Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales. *Well Educated*. **2017**.
- (26) Guzmán, L.; Villabona, Á.; Tejada, C.; García, R. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & amp; Divulgación Científica*. **2013**, 16, 253–262.
- (27) Aceves-Navarro, E. Análisis de La Teoría Aceptada Sobre La Disociación Del Agua. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. **2005**, 2, 65–73.
- (28) Montes Montes, E. J.; Torres Gallo, R.; Andrade Pizarro, R. D. Aumento del punto de ebullición de soluciones modelos para jugo de caña de azúcar. *Temas agrarios*. **2006**, 11, 5-13.
- (29) Advances in Textile Waste Water Treatments. In *Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry*; Muthu, S. S., Ed.; Springer; Singapore, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0065-4>.
- (30) Evaporadores para la Depuración de Aguas Residuales | Zewatech. <https://zewatech.com/> (accessed Jun 4, 2024).



11. ANNEX

Es va dur la mostra C a un laboratori extern per tal d'obtenir una analítica més completa dels paràmetres físico-químics que s'han considerat necessaris per l'estudi, per exemple, per saber les sals que poden precipitar en funció dels metalls, anions i cations presents en les aigües residuals.



C/ Pitàgores 1-7 - 08304 Mataró - Tel. 93 741 61 06 - laborator@aiguesmataro.cat - www.aiguesmataro.cat

INFORME D'ASSAIG

Dades del client

Registre núm: 24-75948/01

Pàgina 1 de 2

Dades de la mostra

Identificació: **AIGUA FENTON AS. AIGUA RESIDUAL DEPURADORA.**

Tipus mostra: Aigua residual

Descripció: 2000 mL de mostra en envàs de plàstic.

Mostra recollida el dia 06/03/2024 per Interessats

Data inici anàlisi: 08/03/2024

Data recepció: 07/03/2024 11:36 h

Data finalització anàlisi: 20/03/2024

Paràmetres Físico-Químics				
Paràmetre	Resultat	Valor Límit	Mètode	Notes
DQO sense decantar (mg O ₂ /L)	313 ±20%	1500	PNT-6017	
pH (upH)	8.3 ±0.2	>=6 i <=10	PNT-6025	
Conductivitat a 25 °C/Sals solubles (µS/cm)	49610 ±18%	6000	PNT-6005	
Nitrogen orgànic i amoniacal (mg/L)	24 ±30%	90	PNT-6019	
Amoni lliure (mg/L)	28 ±20%	60	PNT-6028	
Fòsfor total (mg/L)	<0.5	50	PNT-6015	
Color - dilució 1/30	No apreciable	'No apreciable'	PNT-6000	
Fluorur (mg/L)	0.85	12	PNT-6036	
Fosfats (mg/L)	<0.2		PNT-6042	
Carbonats (mg/L)	<20			(1)(2)
Bicarbonats (mg/L)	120		PNT-6008	(1)
Carboni Orgànic Total/TOC (mg/L)	89 ±30%		PNT-6027	
Anions				
Paràmetre	Resultat	Valor Límit	Mètode	Notes
Clorurs (mg/L)	21300 ±20%	2500	PNT-6011	
Nitrats (mg/L)	486 ±15%	100	PNT-6011	
Sulfats (mg/L)	999 ±20%	1000	PNT-6011	
Nitrits (mg/L)	0.190		PNT-6034	
Bromurs (mg/L)	<5		PNT-6011	(1)
Metalls i Cations				
Paràmetre	Resultat	Valor Límit	Mètode	Notes
Bor total (mg/L)	> 10	3	ICP-MS	(2)
Coure total (mg/L)	0.14 ±20%	3		(2)
Ferro total (mg/L)	0.39	10	ICP-MS	(2)
Liti Total (mg/L)	>20		ICP-MS	(1)(2)
Bari total (mg/L)	0.08 ±20%	10	ICP-MS	(2)
Calci total (mg/L)	400		ICP-MS	(1)(2)
Estronci total (mg/L)	1.8		ICP-MS	(1)(2)
Magnesi Total (mg/L)	1.5		ICP-MS	(1)(2)
Potassi total (mg/L)	833		ICP-MS	(1)(2)
Silici total (mg/L)	6		ICP-MS	(1)(2)
Sodi total (mg/L)	>2000		ICP-MS	(1)(2)

Continua a la següent pàgina



Les activitats marcades amb un (1) no estan emparades per l'acreditació d'ENAC

Aigües de Mataró SA, societat municipal. Inscrita en el Registre Mercantil de Barcelona en el full B-2441, volum 46706, i foli 101 del Llibre de Societats - CIF-A-08007270