



**EPS**

Escola Politècnica

**UdG**

Superior

## **Projecte/Treball Fi de Carrera**

**Estudi:** Enginyeria Tècn. Ind. Química Ind. Pla 2002

**Títol:** DISSENY D'UN ELECTRO-FILTRE A PRESSIÓ A ESCALA DE LABORATORI PER FILTRAR SUSPENSIONS SÒLID-LÍQUID.

**Document:** MEMÒRIA

**Alumne:** David Martínez Capilla

**Director/Tutor:** Xavier Llauro Fàbregas

**Departament:** Eng. Química, Agrària i Tecn. Agroalimentària

**Àrea:** Enginyeria Química

**Convocatòria (mes/any):** 04/2012

## LLISTAT D'ABREVIACIONS I SÍMBOLS

### Nomenclatura grega

$\Delta P$	Pressió aplicada en Pascals (Pa)
$\Delta P_E$	Pressió electroosmòtica (bar)
$\Delta P_H$	Pressió aplicada en bars (bar)
$\varepsilon$	Porositat del tortó
$\varepsilon_0$	Permitivitat del buit (8.85E-12 F/m)
$\mu$	Viscositat dinàmica del filtrat (Pa·s)
$\psi$	Mobilitat electroforètica (m <sup>2</sup> /s.V)
$\rho$	Densitat del filtrat (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_s$	Densitat del sòlid (Kg/m <sup>3</sup> )
$\zeta$	Potencial zeta (V)

### Nomenclatura llatina

$A$	Superfície filtrant (m <sup>2</sup> )
$C_H$	Constant depenent del radi de partícula i gruix de la doble capa
$C_v$	Concentració sòlids (en % vol)
$D$	Constant dielèctrica en la fase líquida
$E$	Camp elèctric (V/m)
$E_{cr}$	Camp elèctric crític (V/m)
$F$	Constant de Faraday (96485 C/mol)
$J$	Flux de filtrat (L/m <sup>2</sup> ·h)
$k$	Factor concentració
$L$	Coeficient electroosmòtic
$L_c$	Gruix del tortó (m)
$L_m$	Gruix fictici del medi filtrant (m)
$M$	Massa molar de la substància (g/mol)
$m$	Massa de la substància produïda en l'elèctrode (g)
$n$	Nombre de valència de la substància com ió en la solució

$Q$	Cabal de filtrat ( $m^3/s$ )
$q$	Càrrega total que passa per la solució (Coulombs)
$r_c$	Resistència específica del tortó Eq. Darcy ( $m^{-2}$ )
$R_m$	Resistència del medi filtrant ( $m^{-1}$ )
$R$	Resistència elèctrica ( $\Omega$ )
$R_t$	Resistència del tortó ( $m^{-1}$ )
$t$	Temps (s)
$u_e$	Mobilitat electroforètica $m/s/V/m$
$V$	Volum de filtrat ( $m^3$ )
$v$	Volum de torta de filtració formada per volum de filtrat format
$V_e$	Velocitat electroforètica (m/s)
$W$	Massa del tortó (Kg)
$w$	Massa tortó rentat i sec (Kg)
$w_0$	Massa tortó humit (Kg)
$w_s$	Pes de sòlid present per unitat de volum ( $Kg/m^{-3}$ )
$x$	Concentració de sòlids en la suspensió

**Subíndexs:**

eo	Electroosmosis
an	Ànode
ca	Càtode
p	Degut a la pressió

# ÍNDEX

## CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

1.1	Introducció.....	pàg 7
1.2	Objectius.....	pàg 8
1.3	Estructura.....	pàg 10
1.4	Planificació.....	pàg 12

## CAPÍTOL 2: BASE TEÒRICA

2.1	Filtració.....	pàg 14
2.2	Efectes de les variables de filtració.....	pàg 17
2.3	Doble capa elèctrica.....	pàg 19
2.4	Potencial zeta.....	pàg 20
2.5	Fenòmens electrocinètics.....	pàg 21
2.5.1	Electroosmosi.....	pàg 22
2.5.2	Electroforesi.....	pàg 23
2.5.3	Efecte de l'electròlisi.....	pàg 25
2.5.4	Efecte de la temperatura sobre la viscositat.....	pàg 26

## CAPÍTOL 3: LA FILTRACIÓ A L'ACTUALITAT

3.1	Tècniques de filtració.....	pàg 27
3.1.1	Filtració per gravetat.....	pàg 27
3.1.2	Filtració a pressió.....	pàg 28
3.1.3	Filtració al buit.....	pàg 28
3.2	Problemes de la filtració actual.....	pàg 29

## CAPÍTOL 4: ELECTRO-FILTRACIÓ

4.1	Teoria.....	pàg 31
4.2	Antecedents (experiències realitzades en electro-filtració).....	pàg 32
4.3	Filtres electrocinètics a pressió dissenyats fins l'actualitat.....	pàg 33
4.3.1	Electro-filtre d'una cara.....	pàg 33

4.3.2 Electro-filtre de dues cares.....	pàg 37
4.3.3 Electro-filtre CINETIK®.....	pàg 39

## **CAPÍTOL 5: DISSENY PILOT D'UN ELECTROFILTRE**

5.1 Introducció.....	pàg 41
5.2 Descripció de l'equip.....	pàg 42
5.3 Detall despeses instal·lació.....	pàg 52

## **CAPÍTOL 6: DISSENY EXPERIMENTAL: MOSTREIG I METODOLOGIA**

6.1 Introducció.....	pàg 54
6.2 Mostreig.....	pàg 54
6.2.1 Pols de vidre.....	pàg 54
6.2.2 Puré de patata, concentrat de verdures i ciment.....	pàg 56
6.3 Experimentacions amb la pols de vidre variant la intensitat de camp elèctric.....	pàg 57
6.3.1 Introducció.....	pàg 57
6.3.2 Variacions en el temps de filtració.....	pàg 58
6.3.3 Variacions en el % de matèria sòlida obtingut del tortó .....	pàg 59
6.3.4 Variació de les característiques del filtrat.....	pàg 61
6.4 Experimentacions amb puré de patata, concentrat de verdures i ciment.....	pàg 62

## **CAPÍTOL 7: RESULTATS I DISCUSSIÓ**

7.1 Efectes de la variació del camp elèctric. Experimentacions amb pols de vidre.....	pàg 64
7.1.1 Millores en el temps de filtració.....	pàg 65
7.1.2 Millores en el % de matèria sòlida obtingut en el tortó.....	pàg 67
7.1.3 Anàlisi de l'evolució de les propietats del filtrat.....	pàg 68
7.2 Determinació de la pressió electroosmòtica i la resistència específica del tortó a partir de les experimentacions realitzades amb la suspensió de pols de vidre.....	pàg 75

7.2.1 Càlcul de la pressió electroosmòtica.....	pàg 75
7.2.2 Càlcul de la resistència específica del tortó.....	pàg 76
<b>7.3</b> Efecte del camp elèctric sobre suspensions de puré de patata, concentrat de verdures i ciment.....	pàg 80

## **CAPÍTOL 8: ESTUDI ECONÒMIC**

<b>8.1</b> Introducció.....	pàg 83
<b>8.2</b> Factors econòmics.....	pàg 84
8.2.1 Costos d'instal·lació, pressupost i planificació.....	pàg 84
8.2.2 Costos d'operació.....	pàg 87
<b>8.3</b> Pay-back de la instal·lació.....	pàg 88

## **CAPÍTOL 9: CONCLUSIONS I RECOMANACIONS**

<b>9.1</b> Conclusions.....	pàg 93
<b>9.2</b> Recomanacions i possibles millores.....	pàg 95

<b>REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES</b> .....	pàg 96
--	--------

<b>AGRAÏMENTS</b> .....	pàg 100
-------------------------	---------

# CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

## 1.1 Introducció

L'optimització dels sistemes de separació d'aigua de suspensions sòlid-líquid és un dels problemes que afronta la indústria actual. La separació de sòlids insolubles en suspensió en un líquid és una operació unitària coneguda amb el nom de filtració i és àmpliament emprada en la indústria. Per la realització d'aquesta separació, els processos mecànics són els més utilitzats enfront els processos tèrmics, basant-se en consideracions econòmiques.

Per tal de separar el líquid del sòlid i crear el que és conegut amb el nom de tortó de filtració, l'aigua ha de ser extreta i el contingut de sòlids augmentat. Entre els diferents sistemes emprats a la indústria actual per extreure l'aigua es troben els filtres premsa, filtres rotatoris al buit i centrífugues. L'eficiència de cada sistema es veu condicionada per les característiques i el tipus de suspensió que es tracta.

Però el problema general que tenen aquests equips és que l'aigua que poden extreure mitjançant l'aplicació d'una força mecànica és limitada. Recordar que en una suspensió sòlid-líquid l'aigua es troba de quatre formes diferents:

- *Lliure*: Sense cap associació amb les partícules.
- *Lligada*: Associada a la partícula de tres possibles maneres:
  - Retinguda capil·larment en el sòlid.
  - Unida per ponts d'hidrogen a la superfície del sòlid.
  - Hidratant químicament la partícula sòlida.

Les tecnologies actuals basades en compressió mecànica només poden extreure l'aigua lliure i l'aigua retinguda capil·larment. Per eliminar la resta de formes d'aigua s'han d'aplicar mètodes tèrmics, que comporten grans inversions de capital i elevats costos d'operació.

Per aquesta raó, en els darrers 20 anys s'han estudiat noves tècniques que permeten obtenir millores en la filtració mecànica gràcies a l'aplicació d'una força addicional, com són els ultrasons, calor, camps magnètics o camps elèctrics. Aquesta darrera tècnica, basada en l'aplicació d'un camp elèctric, és anomenada electro-filtració i ha sigut especialment investigada per els bons resultats obtinguts. Els estudis realitzats s'han centrat bàsicament en l'extracció d'aigua dels fangs de depuradora,

degut als baixos rendiments de les tècniques a pressió convencional, i s'ha arribat a comercialitzar fins i tot un filtre premsa elèctric.

Molts investigadors com Heath i Demirel (1984) [1]; Kondoh et al (1990) [2]; Yoshida i Yukawa (1988) [3]; Golla et al. (1992) [4]; Gingerich et al. (1999) [5]; Larue et al. (2001) [6]; Raats et al. (2002) [7]; Weber and Stahl, 2002 [8], han demostrat que l'electro-filtració és un procés més eficient que la filtració a pressió convencional, ja que s'obtenen filtracions més ràpides amb major extracció d'aigua del tortó obtingut.

Però l'aplicació de camps elèctrics en la filtració no és una tècnica nova. La precipitació electrostàtica és una tecnologia molt desenvolupada i emprada en la separació de partícules en medi gasós. En els precipitadors electrostàtics per el tractament de gasos, les partícules travessen un flux d'ions negatius creats per una font de camp elèctric, es carreguen negativament i es sotmeten a l'acció del camp elèctric que els atrau cap als elèctrodes recol·lectors, on es dipositen sobre ells i amb un sistema mecànic són separades del flux gasós.

Així doncs, aplicant el mateix funcionament dels precipitadors electrostàtics sobre una suspensió sòlid-líquid, es defineix l'electro-filtració com aquella tècnica que consisteix en aplicar un camp elèctric sobre una suspensió sòlid-líquid per tal de desencadenar dos efectes: l'electroforesi i l'electroosmosi. D'aquesta manera es pot extreure una major quantitat d'aigua que la que es s'extrauria si no s'apliqués aquest camp elèctric. El primer efecte representa el moviment de les partícules en suspensió relatives a la fase líquida en un camp elèctric, mentre que el segon descriu el transport del fluid en una matriu carregada, en el cas de la filtració aquesta matriu és el tortó de sòlids, d'una suspensió sotmesa a un camp elèctric.

## **1.2 Objectius**

Com s'ha comentat a l'introducció, nombrosos investigadors han demostrat que l'electro-filtració és un tècnica que permet obtenir majors rendiments respecte la filtració a pressió convencional de suspensions sòlid-líquid. Aquests estudis han estat bàsicament centrats en la filtració dels fangs de depuradora, on es tracten grans quantitats diàries i per tant és interessant disposar d'un sistema de filtració més ràpid, eficaç i econòmic que les filtracions tradicionals amb pressió. La majoria d'investigacions realitzades només contemplaven l'efecte de l'electroosmosi, obviant les influències de l'electroforesi i estaven basats en filtres de doble cara, per simular



els filtres premsa industrials emprats en l'assecatge de fangs. Per tant, fins al moment s'ha demostrat que és una tècnica perfectament aplicable per aquell tipus de substàncies que són un residu i han de ser rebutjades.

Però, pot ser aquesta tècnica aplicable en altres tipus de procés com per exemple indústries farmacèutiques, alimentàries o químiques, on interressi extreure aigua d'una suspensió sòlid-líquid sense alterar les propietats del sòlid obtingut? O aquesta tècnica, per l'efecte de l'aplicació del camp elèctric, només és útil per aquell tipus de processos on el sòlid obtingut pugui ser alterat degut a que és un rebuig? Després de realitzar els estudis pertinents, aquest projecte donarà resposta a aquesta pregunta.

Els objectius d'aquest projecte són principalment els que s'enumeren a continuació.

1. Estudiar en què consisteix la tècnica d'electro-filtració.
2. A partir d'un pressupost relativament baix (120 €), dissenyar i muntar un sistema d'electro-filtració a nivell de laboratori mitjançant un filtre d'una sola cara al que se li apliqui un camp elèctric i pressió constants.
3. Comprovar si es compleix la teoria proposada per altres investigadors analitzant l'evolució de la filtració d'una suspensió sòlid-líquid al variar la intensitat del camp elèctric, tenint en compte l'efecte de l'electroosmosi i el de l'electroforesi.
4. Avaluar els efectes de les reaccions electrolítiques que es produeixen.
5. Avaluar si es produeix una alteració de les propietats de les mostres filtrades per determinar per a quin tipus de substàncies i processos aquesta nova tècnica és aplicable.
6. Realitzar l'estudi econòmic a partir dels resultats obtinguts.

La viabilitat econòmica del procés és un dels factors més importants a tenir en compte. Segons la teoria i els estudis realitzats fins al moment, al aplicar el camp elèctric s'han d'observar millores respecte la filtració a pressió convencional, però els resultats només seran interessants si aquesta millora comporta un estalvi econòmic respecte la filtració a pressió.

Tot i que l'estudi es realitzarà a nivell de laboratori sense cap aplicació industrial concreta, les conclusions que s'extrauran d'ell determinaran per a quin tipus d'indústria és aplicable aquesta variant de l'operació unitària.

### 1.3 Estructura

El treball està organitzat en capítols. A continuació es comenta breument en què consisteixen cada un d'ells.

*CAPÍTOL 1:* Introducció, definició d'objectius, estructura i planificació del projecte final de carrera.

*CAPÍTOL 2:* En aquest segon apartat s'estudia la teoria que envolta la filtració i l'electro-filtració. Primer es fa un repàs sobre la filtració actual a la indústria. Seguidament s'introdueix el concepte de la doble capa elèctrica que és imprescindible assimilar per entendre els efectes electrocinètics explicats a continuació, en especial l'electroosmosi i l'electroforesi.

*CAPÍTOL 3:* Es fa una revisió de les tècniques actuals emprades en la indústria per filtrar suspensions sòlid-líquid i s'enumeren un seguit d'inconvenients que estan associats amb aquesta tècnica.

*CAPÍTOL 4:* Un cop coneguda la teoria que envolta l'electro-filtració, al capítol 4 s'explica en què consisteix aquesta tècnica i quins resultats s'han obtingut en els estudis realitzats fins al moment per altres investigadors. S'explica i es detalla el model matemàtic dels dos tipus de filtre que es poden dissenyar: d'una o de dues cares de filtració. Per acabar es fa referència a un dels electro-filtres comercialitzats actualment per al tractament de fangs.

*CAPÍTOL 5:* Per tal de realitzar les experimentacions, es dissenya i es munta un electro-filtre a escala laboratori. En aquest apartat es detallen les parts que conformen l'equip muntat juntament amb els diagrames necessaris.

*CAPÍTOL 6:* Aquest apartat proposa un disseny experimental per tal d'avaluar si l'aplicació d'un camp elèctric en la filtració, provoca alguna millora. Per fer-ho s'experimenta amb una suspensió de pols de vidre ( $\text{SiO}_2$ ) provinent d'una cristalleria

del polígon industrial de Palafrugell, que degut al seva mida de partícula, provoca unes elevades resistències específiques del tortó i unes filtracions lentes. Per tal de variar la intensitat del camp elèctric es varia el voltatge aplicat sobre els elèctrodes situats en el filtre i, degut a que la font d'alimentació amb que es treballa té un límit de 30 V, es varia la conductivitat de la mostra per obtenir intensitats de camp elèctric més elevades. S'analitza l'evolució del temps de filtració i el % de matèria seca obtinguda del tortó per a diferents valors de camp elèctric. També s'avalua com varien les propietats del filtrat amb el temps, analitzant la conductivitat, el pH, la terbolesa i temperatura d'aquest.

Com que els estudis realitzats fins al moment no han demostrat si la tècnica és aplicable per aquell tipus de processos on el sòlid format no és un rebuig (com podrien ser indústries alimentàries, químiques o farmacèutiques), s'analitza la variació de les propietats de tres tipus de substància diferents a la pols de vidre: puré de patata, concentrat de verdures i ciment (després de ser sotmeses a l'electro-filtració).

Es determina també com s'ha realitzat el mostreig de cada substància amb les que s'ha experimentat.

**CAPÍTOL 7:** En aquest apartat es mostren i es discuteixen els resultats obtinguts a partir de les experimentacions realitzades seguint el disseny experimental comentat en el capítol 6. A més a més, segons les fórmules desenvolupades en l'apartat de teoria i els resultats obtinguts, es calcula la pressió electroosmòtica per observar l'efecte de l'electroosmosi i la variació de la resistència específica del tortó per observar l'efecte de l'electroforesi. Es demostra també que les equacions que governen l'efecte de l'electroosmosi i de l'electroforesi són vàlides i es compleixen.

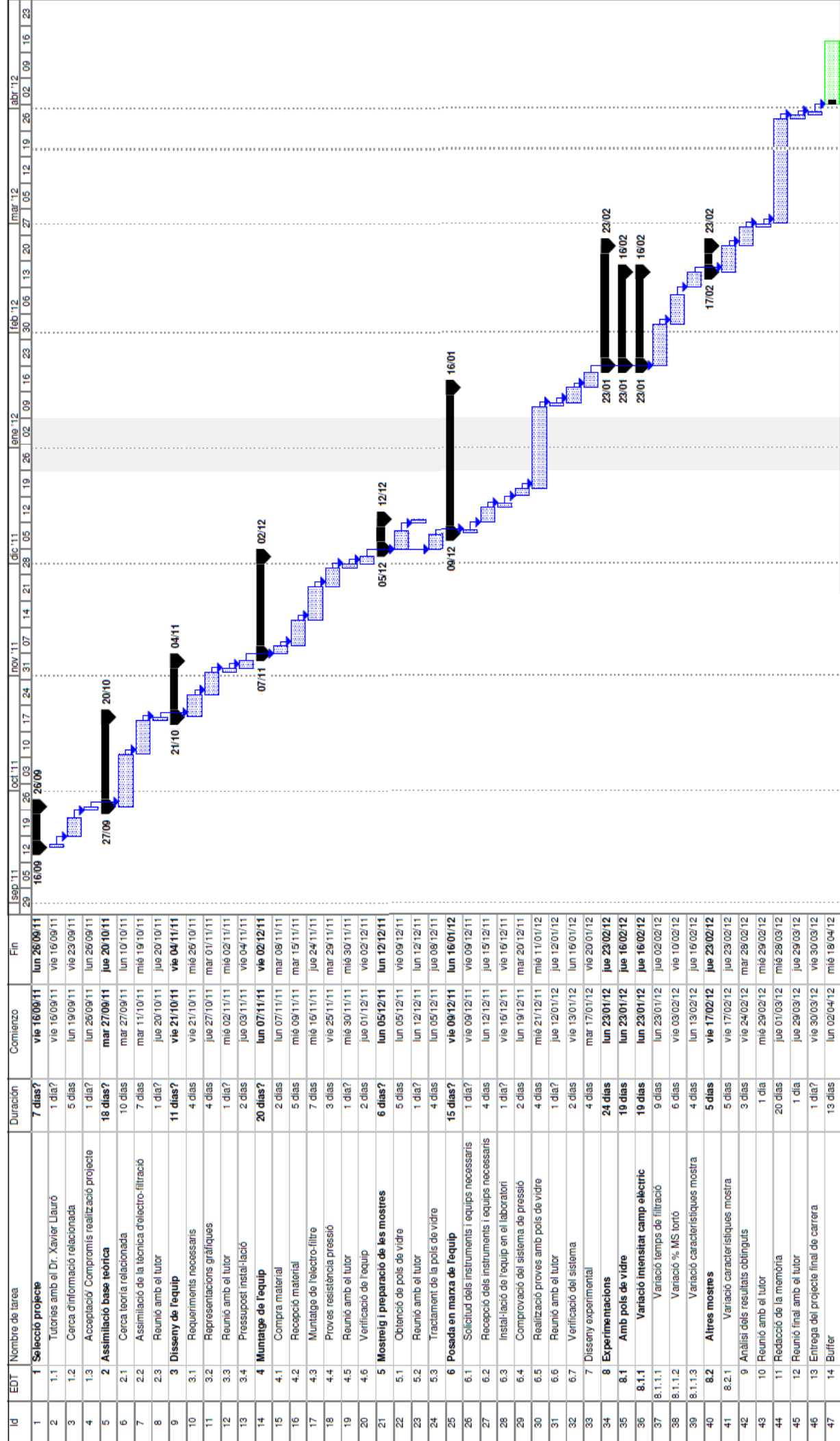
**CAPÍTOL 8:** Un cop obtinguts i analitzats els resultats experimentals, s'utilitzen aquests per fer l'estudi econòmic del funcionament simulat d'un electro-filtre encarregat de filtrar la pols de vidre generada per una cristalleria, que és recollida mitjançant aigua. Per treballar amb dades properes a la realitat, es determina una quantitat diària de substància a tractar i un temps de filtració necessari per filtrar-la, emprant una filtració a pressió convencional. A partir d'aquests dos valors, utilitzant les relacions experimentals entre la filtració a pressió i l'electro-filtració obtingudes en el capítol 7, s'avalua si la nova tècnica comporta uns beneficis respecte la filtració tradicional i quin és el pay-back de la instal·lació.

**CAPÍTOL 9:** En el darrer capítol es resumeixen les conclusions que s'han extret dels resultats obtinguts i es proposen una sèrie de millores del sistema i noves experimentacions a realitzar per ampliar l'estudi realitzat.

#### **1.4 Planificació:**

La planificació del treball es realitza tenint en compte que el projecte s'inicia al Setembre i es pretén entregar a l'Abril. A continuació es mostra el Diagrama de Gantt realitzat amb el programa Microsoft Project, plataforma mitjançant la qual s'ha establert el pla de treball.

## Planificació realització PFC



Tarea    
  Progreso    
  Hitlo    
  Resumen    
  Tarea resumida    
  Tareas externas    
  Progreso resumido    
  División    
  Resumen del proyecto

Tarea    
  Progreso    
  Hitlo    
  Resumen    
  Tarea resumida    
  Tareas externas    
  Progreso resumido    
  División    
  Resumen del proyecto

Tarea    
  Progreso    
  Hitlo    
  Resumen    
  Tarea resumida    
  Tareas externas    
  Progreso resumido    
  División    
  Resumen del proyecto

Proyecto: Planificació projecte  
 Fecha: mié 21/03/12

## CAPÍTOL 2 : BASE TEÒRICA

### 2.1 Filtració

Abans de començar a aprofundir en temes més específics, és important conèixer en què es basa la filtració i conèixer les fórmules bàsiques que governen aquesta tècnica de separació.

S'anomena filtració a l'operació unitària que consisteix en separar sòlids insolubles en suspensió en un líquid, fent passar la suspensió a través d'una membrana porosa que reté les partícules sòlides. A la membrana porosa se l'anomena medi filtrant, a les partícules retingudes tortó i al líquid que travessa el medi porós filtrat.

Per obtenir un flux de filtrat a través del medi porós es pot operar per simple gravetat o aplicant una pressió superior a l'atmosfèrica a la part superior del medi filtrant o aplicant el buit a la part inferior de la membrana porosa. Aquestes tres opcions s'anomenen filtració per gravetat, filtració a pressió i filtració al buit respectivament.

Les aplicacions dels processos de filtració són molt àmplies i particularment importants en la indústria química, farmacèutica i alimentària. Es distingeixen tres tipus de filtració.

- *Filtració per superfície o medi filtrant:* Les partícules més grans que el diàmetre dels porus del medi filtrant, queden retingudes sobre la superfície mentre que les partícules que són menors a aquest diàmetre passaran i bloquejaran els capil·lars del medi filtrant. En aquest tipus de separació, la quantitat de partícules dipositades no arriba a formar un tortó de gruix considerable.

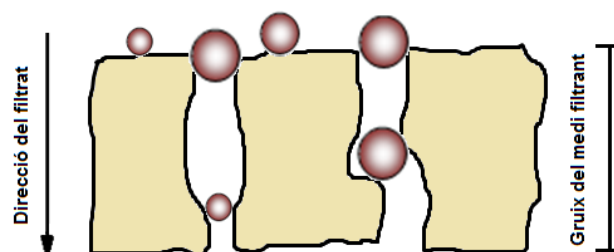


Fig 2.1 Esquema filtració per superfície.

- *Filtració profunda:* Comparada amb la filtració per superfície, les partícules de menor mida que els diàmetres dels porus del medi filtrant seran retingudes dins

d'ell. Això succeeix per l'adherència de les partícules en les parets del medi filtrant i sobre les partícules ja dipositades. A mesura que el medi filtrant es carrega amb partícules, la resistència augmenta. Quan el cicle de separació termina, el medi filtrant es canvia.

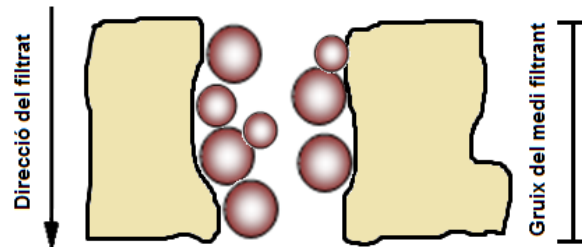


Fig 2.2 Esquema filtració profunda.

- *Filtració per formació de tortó:* És el mecanisme més comú en els processos industrials i el més interessant per l'enginyer químic. Quan la suspensió conté una quantitat considerable de sòlids insolubles, al ser filtrada, aquests sòlids formen un llit anomenat tortó sobre el medi filtrant i aquest llit pot actuar com a medi filtrant dependent del seu gruix, porositat i permeabilitat.

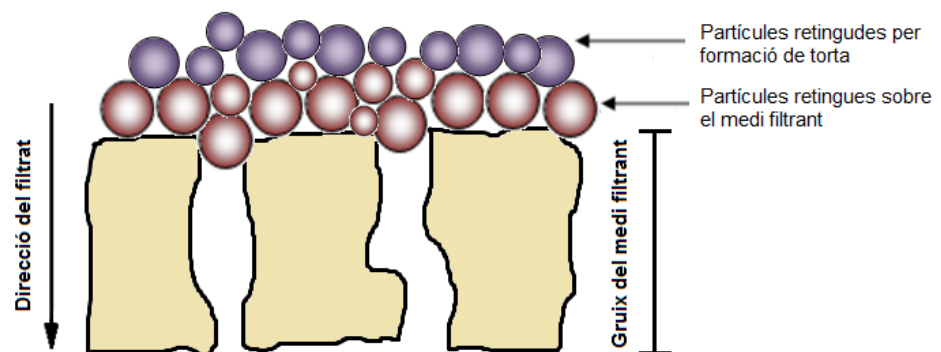


Fig 2.3 Esquema filtració per formació de tortó.

En el procés de filtració es diferencien principalment tres fases:

- *Etapa inicial:* Correspon al moment inicial on les partícules es troben distribuïdes per tota la suspensió.
- *Formació del tortó:* A mesura que avança la filtració, les partícules es van dipositant en el medi filtrant i formen un tortó.
- *Etapa final:* Té lloc quan ja s'ha format tot el tortó però encara queda líquid per anar filtrant. En aquesta etapa és on s'obtenen les velocitats més lentes de filtració.

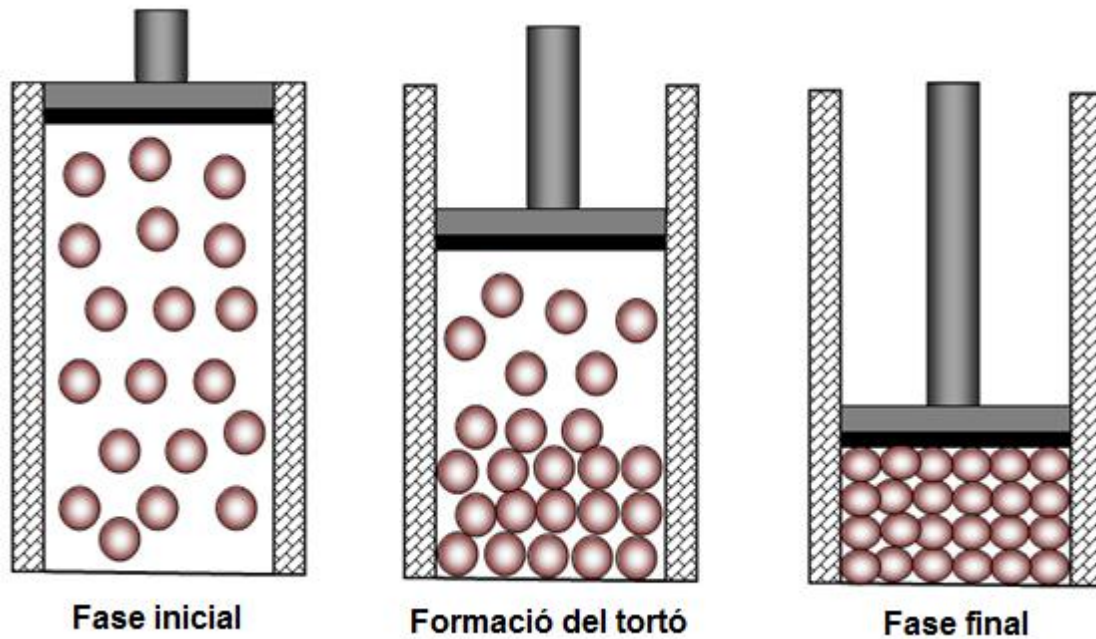


Fig 2.4 Fases de la filtració.

Es distingeixen dos tipus de tortons de filtració:

- *Tortons incompressibles*: Quan la resistència específica del tortó no varia amb el gruix d'aquest i és independent de la pressió aplicada. Aquest tipus de tortons es formen a partir de partícules sòlides, no deformables i rígides, en les que els valors de porositat i superfície específica del tortó no es veuen afectats per la compressió aplicada.
- *Tortons compressibles*: Generalment les partícules que formen el tortó són flexibles i deformables. Per aquest motiu, la resistència específica del tortó depèn de la pressió aplicada i va variant a mesura que varia el gruix de la torta.

Hi ha principalment dues maneres d'enfocar la filtració per obtenir un model matemàtic: a partir de pressió constant o a partir de volum de filtrat constant. Si es treballa a pressió constant, el cabal de filtrat a mesura que augmenta el gruix del tortó anirà disminuint. Per contra si es treballa a cabal constant, a mesura que augmenta el tortó, la pressió aplicada haurà d'augmentar.

En aquest apartat es comenten les formules matemàtiques relacionades amb una filtració mantenint la pressió constant. El tipus de filtre es tracta d'un filtre d'una sola cara, on la suspensió s'introdueix per la part superior del filtre i el filtrat es recull per la part inferior. Aquest tipus de filtre és com l'electro-filtre que es dissenyarà per tal de realitzar les experimentacions.



L'equació fonamental de la filtració es coneix com equació de Darcy i és la que permet calcular el cabal de filtrat.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu(r_c L_c + R_m)} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Per determinar les resistències específiques del tortó i del medi filtrant s'ha de treballar a pressió constant ja que per tortons compressibles els valors de  $r_c$  i  $R_m$  varien durant la filtració i la integració és difícil. Però l'experiència ha mostrat que si es manté la pressió constant entre les dues cares del tortó, aquests valors varien molt poc fet que permet que es pugui integrar i obtenir els valors de les resistències.

## 2.2 Efectes de les variables de filtració

L'efecte de cadascuna de les variables que es veuen directa o indirectament reflectides en l'equació de Darcy es poden constatar en la majoria dels casos pràctics i de les aplicacions, essent el seu coneixement i control de vital importància per entendre els processos industrials.

- *Pressió:* En la majoria dels casos la compressibilitat del tortó de filtració es troba entre valors de 0,1 i 0,8 de manera que la major part del augment de la pèrdua de càrrega del fluid és conseqüència del medi filtrant. En general, si l'augment de la pressió comporta un augment significatiu del cabal o velocitat de filtració, és un indicatiu de la formació d'un tortó granulat. En canvi, per tortons espessos de partícules molt fines, un augment de la pressió aplicada no resulta en un augment significatiu del cabal de filtrat. En altres casos, el tortó es caracteritza per una pressió crítica per sobre la qual, la velocitat de filtració disminueix.
- *Tortó de filtració:* Segons l'equació de Darcy, el cabal de filtració és inversament proporcional al gruix del tortó. Aquesta observació comporta que la màxima productivitat s'aconseguirà teòricament amb aquells tortons de gruix molt fi. No obstant, altres factors com el temps per regenerar el tortó, la seva dificultat de descàrrega i el cost d'una superfície de filtrat més àmplia, expliquen que a la pràctica es prefereixi treballar en condicions de tortons més gruixuts.

- *Viscositat i temperatura:* El cabal de filtrat és inversament proporcional a la viscositat del filtrat, tal i com indica l'equació de Darcy. Per tant, quan menys viscosos sigui el líquid, més cabal de filtrat s'obtindrà. L'efecte de la temperatura sobre la velocitat de filtració és evident, sobretot mitjançant el seu efecte sobre la disminució de la viscositat al incrementar la temperatura.
- *Mida de partícules i concentració:* L'efecte de la mida de partícules sobre la resistència del tortó i el medi filtrant és molt notable ja que afecta al coeficient quan es calcula la resistència del tortó.
- *Medi filtrant:* El medi filtrant és l'element fonamental per la pràctica de la filtració i la seva elecció és habitualment la consideració més important per garantir el funcionament del procés.

En general, entre els principals criteris de selecció del material del medi filtrant es poden destacar:

- Compatibilitat i resistència química amb la substància a filtrar
- Mida mínima de partícula retinguda
- Permeabilitat o resistència al fluid
- Resistència a la calor, a l'acció de productes químics, a canvis de pH, a l'abració
- Flexió i ruptura
- Estabilitat dimensional
- Facilitat de neteja
- Adaptació a l'equip de filtració i manteniment
- Relació vida útil i cost

La varietat de tipus de medis porosos emprats com a medis filtrants és molt diversa: en forma de teles i fibres teixides, feltres i fibres no teixides, sòlids porosos o perforats, membranes polimèriques, sòlids particulats, teles metàl·liques, teles naturals, teles sintètiques i plaques de cel·lulosa.

- *Materials pre-capac o coadjuvants:* Addicionalment, algunes aplicacions de especial dificultat per la baixa velocitat del fluid, complexitat de la barreja o dificultat per retenir les partícules, requereixen l'utilització d'ajuda-filtres, materials de pre-filtració o materials pre-capac.

Aquests són substàncies granulades o fibroses que permeten la formació sobre el medi filtrant d'un tortó pre-filtrant addicional, de major permeabilitat i

major profunditat, on queden retingudes les fases heterogènies en forma de floculs deformables o pastes de major viscositat i contingut en sòlids fins.

En general aquestes substàncies es caracteritzen per la seva baixa densitat, la seva facilitat per recobrir les superfícies del medi filtrant, la seva compressibilitat i baixa tendència a sedimentar i la seva inèrcia química amb el fluid. Alguns exemples de substàncies emprades com ajuda-filtres són les següents:

- Terres diatomees o terres diatomàcies (sílice d'alta puresa)
- Terres de Kieselguhr (diatomita)
- Perlita o lava expandida (silicat àlcali d'alumini)
- Fibres de cel·lulosa o polpa de fusta triturada
- Guix
- Carbó actiu



Fig 2.5 D'esquerra a dreta: terres diatomees, terres de Kieselguhr, perlita, fibres de cel·lulosa i carbó actiu.

### **2.3 Doble capa elèctrica**

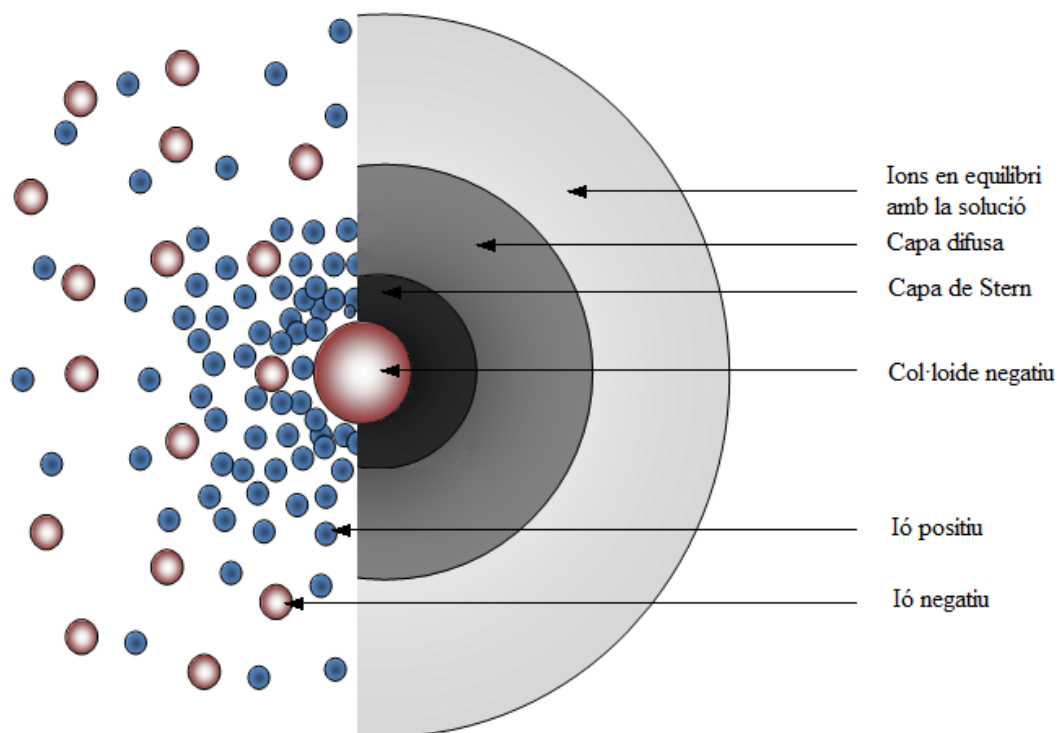
Quan un sòlid està en contacte amb un fluid electròlit es produeix una distribució coneguda com a doble capa elèctrica. Aquest fenomen ens permet visualitzar l'atmosfera iònica en la proximitat del sòlid i explicar com actuen les forces elèctriques d'atracció-repulsió.

El model de la doble capa va ser estudiat per primer cop per Helmholtz al 1879 [13] on només es contemplava l'adsorció d'ions de signe contrari en la superfície de la partícula.

Més tard, entre 1910 i 1913, Gouy [14] i Chapman [15] varen aportar una sèrie de modificacions al considerar que els ions es repartien sobre la superfície del sòlid formant una capa difusa de cations i anions amb la funció de balancejar la càrrega de l'elèctrode.

Actualment s'utilitza el model de Gouy-Chapman-Stern, en el qual es combina la capa absorbida de Helmholtz amb la doble capa difusa de Gouy-Chapman.

Aquest model s'entén com una seqüència d'etapes que succeeixen al voltant d'una partícula amb càrrega. Sobre la partícula carregada s'hi uniran mitjançant forces d'atracció i d'adsorció ions del signe contrari a la partícula, anomenats contraions, i formaran una capa rígida anomenada capa de Stern. Altres contraions, seran atrets per la pròpia partícula i rebutjats per la capa de Stern i per els propis contraions que intenten unir-se a la partícula, degut a la força de repulsió entre ions de la mateixa càrrega elèctrica. Així doncs, es produeix un equilibri dinàmic i es forma una nova capa anomenada capa difusa, formada per anions i cations. Aquesta capa difusa té un dèficit d'ions del mateix signe que la partícula que desencadena la formació de la doble capa, donat que aquests ions seran repelsats per la partícula. El conjunt de la capa de Stern i la capa difusa forma l'anomenada doble capa.



*Fig 2.6 Distribució de la doble capa per una partícula negativa.  
La capa difusa amb dèficit d'ions negatius.*

## **2.4 Potencial zeta**

El potencial zeta és un terme científic emprat en potencials electrocinètics en suspensions col·loïdals que es sol representar amb el signe grec  $\zeta$ .

Es defineix com a potencial elèctric el treball que ha de realitzar una força externa per portar una càrrega unitària  $q$  des de la referència fins a un punt determinat, en contra d'una força elèctrica.

Així doncs, en referència a la doble capa elèctrica el potencial zeta és una mesura de l'estabilitat d'una partícula i indica el potencial que es requereix per penetrar la capa d'ions que rodeja la partícula per desestabilitzar-la.

Altament dit, el potencial zeta és la potència electrostàtica que existeix entre la separació de les capes (Stern i difusa) que envolten la partícula sòlida que indica el grau de repulsió entre partícules carregades en una dispersió. Per partícules que són suficientment petites, un potencial zeta elevat proporcionarà estabilitat ja que la solució o dispersió oposarà major resistència a la unió de partícules al col·loide. Quan el potencial zeta és baix, l'atracció sobrepassa a la repulsió, s'uneixen partícules al col·loide i la suspensió flocula. Per tant, col·loides amb un elevat potencial zeta són elèctricament estables.

El potencial zeta és una dada que afecta directament al cabal d'electro-filtrat. Segons la teoria comentada en el següent apartat, el cabal de filtrat aplicant un camp elèctric és proporcional al valor del potencial zeta. Així doncs, el cabal de filtrat augmenta quan augmenta el valor del potencial zeta. El valor d'aquest potencial es veu afectat per la concentració d'ions, pel pH i per la conductivitat.

## 2.5 Fenòmens electrocinètics:

L'aplicació d'una corrent continua en una suspensió líquida crea un camp elèctric que desencadena una sèrie de fenòmens electrocinètics que a continuació són detalladament explicats.

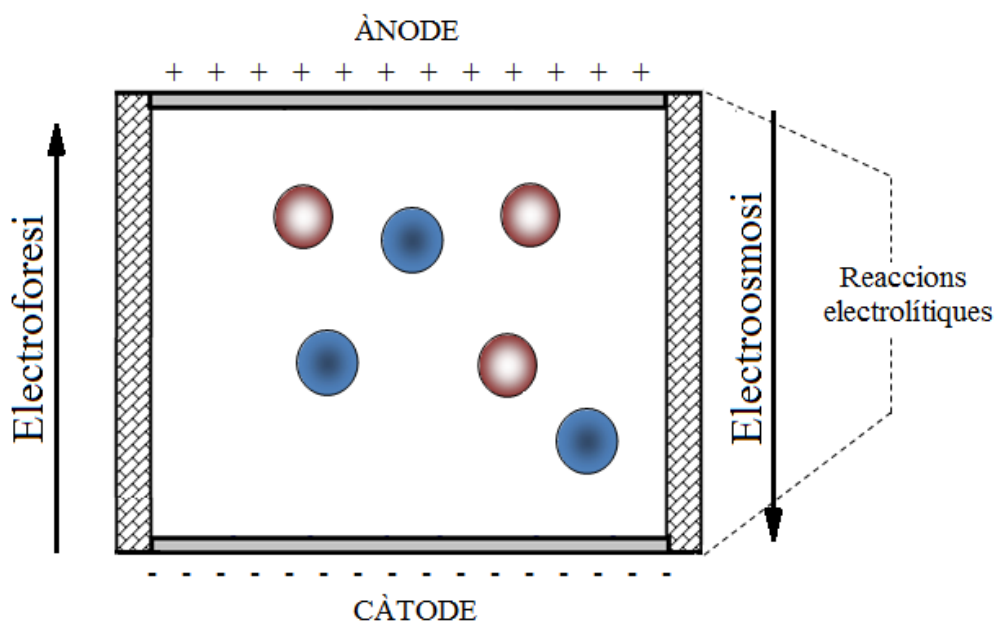


Fig 2.7 Esquema bàsic dels fenòmens electrocinètics per partícules negatives.

### 2.5.1 Electroosmosi

Es coneix per electroosmosis el moviment d'un líquid, induït per l'aplicació d'un potencial, a través d'un material porós, capil·lar, membrana o qualsevol altre líquid conductor. Donat que les velocitats d'electroosmosi són independents de la mida del conducte, sempre que la doble capa elèctrica sigui més petita que el canal (material porós, capil·lar o membrana) per on ha de fluir el líquid, es pot afirmar que l'efecte de l'electroosmosi és més visible per canals de mida més reduïda.

L'electroosmosi consisteix en un procediment mitjançant el qual s'aconsegueix difondre líquids en suspensions líquid-líquid o líquid-sòlid, al aplicar un camp elèctric exterior. En el cas de l'electro-filtració, és el fenomen electrocinètic que té més importància, ja que desplaça un cabal de fluid filtrat considerable.

FF. Reuss al 1807 [16] va descriure per primer cop els efectes de l'electroosmosi demostrant que l'aigua podia fluir a través d'un tap d'argila al aplicar un camp elèctric. L'argila està composta per partícules molt compactades de sorra i altres minerals i l'aigua flueix a través dels espais estrets entre partícules com si fossin conductes. Qualsevol combinació d'un electròlit i un sòlid amb una baixa conductivitat pot desencadenar l'efecte de l'electroosmosi si s'aplica un voltatge sobre la suspensió.

La causa d'aquest efecte electrocinètic és la força de Coloumb induïda per un camp elèctric creat en la solució, normalment a través d'elèctrodes situats a la part superior i inferior del filtre. Com s'ha comentat anteriorment, la distribució dels ions provoca la doble capa elèctrica però, al aplicar un camp elèctric, la càrrega de la doble capa elèctrica és induïda a moure's per la força resultant de Coloumb. Per exemple, una partícula negativa en una suspensió sòlid líquid sota els efectes del camp elèctric provocarà que, segons indica la teoria de la formació de la doble capa, en la capa difusa hi haurà un dèficit d'ions negatius i per tant l'excés d'ions positius serà atret cap al pol negatiu (càtode) arrossegant l'aigua que envolta aquest excés d'ions positius. D'aquesta manera s'obindrà un cabal de filtració conegut com cabal electroosmòtic en el càtode.

L'efecte de l'electroosmosi és habitualment emprat en sistemes de microfluids, tractament i anàlisi de terres, adobat de cuirs, separació en processos de caolí i turba o en la introducció de germicides a la fusta. Recentment, s'està aplicant aquesta tècnica per eliminar les humitats que apareixen en els habitatges.

Segons l'equació de Hiemenz i Rajagopalan [17] el cabal electroosmòtic es pot calcular mitjançant la següent expressió:

$$Q_{eo} = \frac{dV}{dt} = \frac{D\varepsilon_0\zeta \cdot E \cdot A}{\mu} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

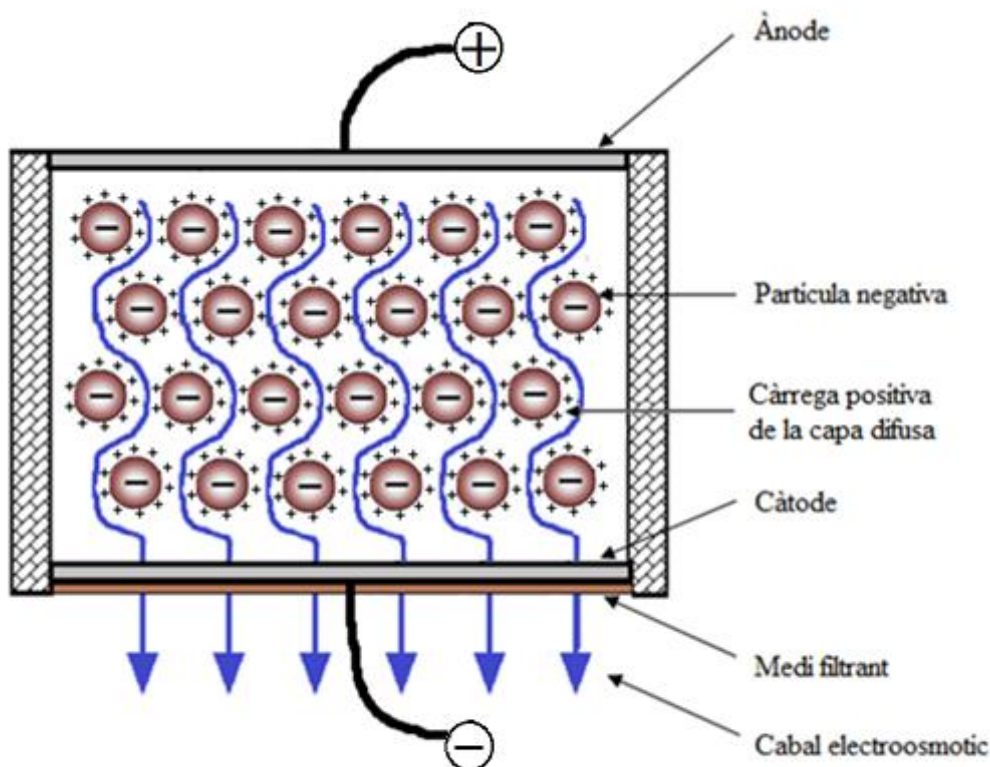


Fig 2.8 Representació del moviment electroosmòtic d'una partícula negativa. L'aigua continguda en la capa difusa, és arrossegada cap al càtode.

### 2.5.2 Electroforesi

S'entén per electroforesi el moviment que s'indueix a partícules amb càrrega en una suspensió aquosa sota l'acció d'un camp elèctric. Les partícules positives tendiran a anar cap a l'elèctrode negatiu (càtode) i les negatives cap a l'elèctrode positiu (ànode)

Les primers observacions del principi bàsic de l'electroforesi varen ser portades a terme per Reuss al 1807 [16]. Aquestes experimentacions es basaven en mesurar les propietats i comportaments de petits ions movent-se a través d'una solució aquosa sota la influència d'un camp elèctric.

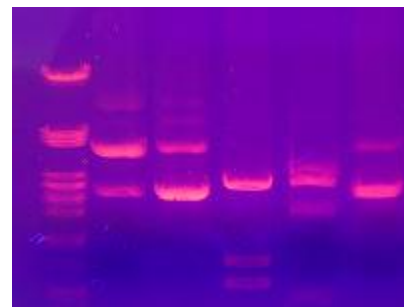


Fig 2.9 Electroforesi capil·lar

L'electroforesi és molt emprada en anàlisi química per separar substàncies segons la seva mobilitat electroforètica al aplicar un camp elèctric sobre un capil·lar normalment de sílice. Aquesta tècnica de separació és coneguda amb el nom de electroforesi capil·lar.

La velocitat electroforètica es pot calcular mitjançant l'equació de Hiemenz i Rajogopalan [17].

$$V_e = \psi \cdot E \quad (\text{Eq. 2.3})$$

La mobilitat electroforètica es relaciona amb el potencial zeta mitjançant l'equació de Henry

$$\psi = C_H \frac{D\epsilon_0\zeta}{\mu} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

L'efecte de l'electroforesi és visible en l'electro-filtració quan les partícules encara estan en suspensió.

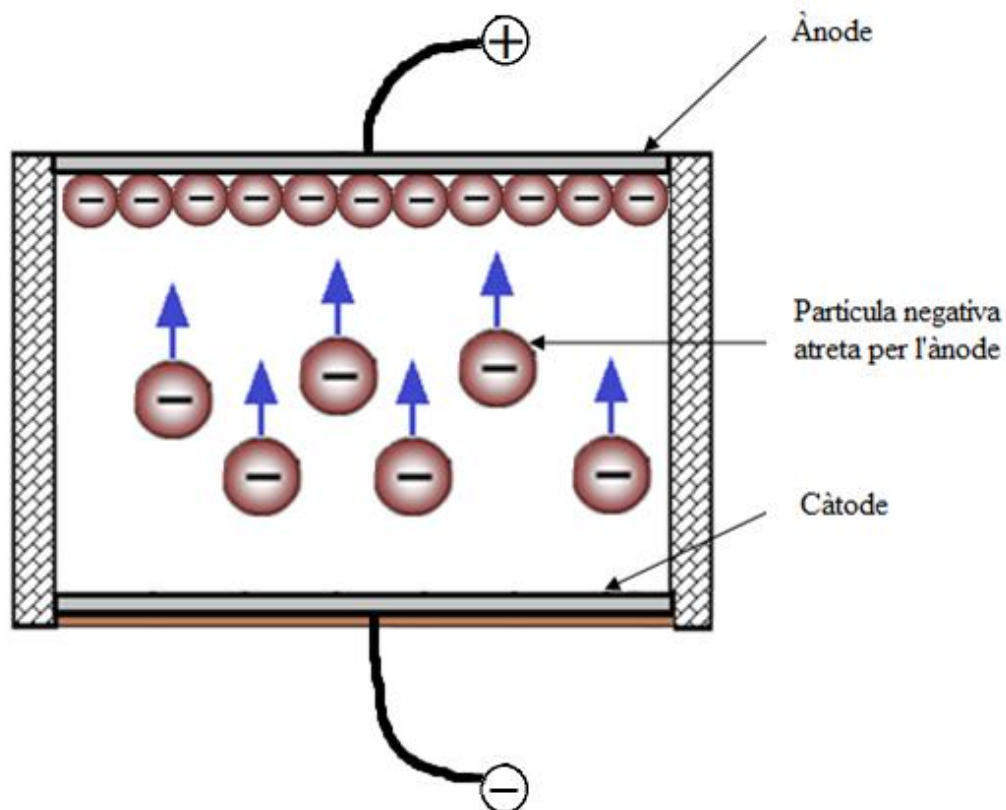


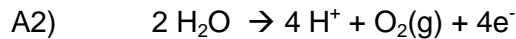
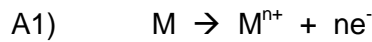
Fig 2.10 Representació del moviment electroforètic. Les partícules negatives tendeixen a anar cap a l'elèctrode positiu (ànode).



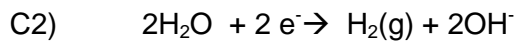
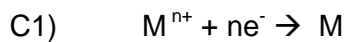
### 2.5.3 Efecte de l'electròlisi

Els voltatges aplicats a l'electro-filtració són normalment superiors al voltatge necessaris perquè es produeixi l'electròlisi. Les possibles reaccions que es produeixen són les següents:

#### ÀNODE:



#### CÀTODE:



M representa el material de l'elèctrode.

És important conèixer les lleis de Faraday per l'electròlisi, que expressen relacions quantitatives en base a les investigacions electroquímiques publicades per Micahel Faraday al 1834 [18].

- *1era llei de Faraday de l'electròlisi:* La massa d'una substància alterada en un elèctrode durant l'electròlisi és directament proporcional a la quantitat d'electricitat transferida a aquest elèctrode. La quantitat d'electricitat es refereix a la quantitat de càrrega elèctrica, que es mesura en coulombs.
- *2a llei de Faraday de l'electròlisi:* Per una determinada quantitat d'electricitat o càrrega elèctrica, la massa d'un material elemental alterat en un elèctrode és directament proporcional al pes equivalent de l'element. El pes equivalent d'una substància és la seva massa molar dividida per un enter que depèn de la reacció que té lloc en el material.

En forma matemàtica la llei de Faraday s'expressa segons la següent equació:

$$m = \frac{1}{F} \frac{Q \times M}{n} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Així doncs, durant el procés d'electro-filtració es desencadenen reaccions d'electròlisi que provoquen una producció d'oxigen en l'ànode i d'hidrogen al càtode. A més a més el pH és reduït a l'ànode, degut a la generació de  $H^+$  i augmentat al càtode per la generació de  $OH^-$

Per tant l'efecte de l'electròlisi bàsicament comporta canvis en el pH, consegüentment en el potencial zeta i augment de la resistència elèctrica degut a la producció de gasos que no condueixen el corrent elèctric.

Amb tot això es pot concloure que l'electròlisi afecta negativament a l'eficiència de l'electro-filtració.

#### 2.5.4 Efecte de la temperatura sobre la viscositat:

Degut a l'aplicació d'un camp elèctric mitjançant una resistència, la suspensió líquida experimenta un augment de temperatura i consegüentment una disminució de la viscositat de la suspensió.

Aquesta variació de viscositat es pot calcular mitjançant les següents fórmules [8]:

$$\log\left(\frac{\mu_{20^{\circ}C}}{\mu}\right) = \frac{A}{B} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$A = 1.37023 \cdot (T - 20) + 8.36 \cdot 10^{-4} (T - 20)^2 \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$B = 109 + T \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Amb una disminució de la viscositat, la suspensió pot fluir més fàcilment a través de l'electro-filtre, per tant és d'esperar un augment de la velocitat de filtració.

## CAPITOL 3: LA FILTRACIÓ A L'ACTUALITAT

### 3.1 Tècniques de filtració

És interessant conèixer quines tècniques són les emprades actualment a nivell industrial per filtrar sòlids en suspensions líquides abans d'aprofundir en l'electrofiltració. Com es comentava anteriorment, la filtració és una operació unitària àmpliament emprada en les indústries que consisteix en separar sòlids continguts en un líquid. Bàsicament existeixen la filtració per superfície o medi filtrant, filtració profunda i la filtració per formació de tortó. En aquest apartat s'aprofundeix en la filtració per formació de tortó que és en la que està basada l'electrofiltració.

La filtració per formació de tortó consisteix en separar un sòlid insoluble d'una suspensió sòlid-líquid fent passar aquesta suspensió a través d'una membrana porosa la qual reté els sòlids en la seva superfície i forma un tortó, gràcies a una diferència de pressió existent entre els dos costats de la membrana.

Els equips consten bàsicament d'un suport mecànic, conductes per on entra i surt la suspensió i dispositius per extreure el tortó. La pressió es pot proporcionar a l'inici del procés, abans del filtre o després del filtre aplicant el buit. Aquests es classifiquen en continus o discontinus segons si s'ha d'aturar l'operació per descarregar els sòlids acumulats o no.

A continuació s'explica breument quines són les tècniques emprades en aquest tipus de filtració i en què consisteixen.

#### 3.1.1 *Filtració per gravetat*

Els filtres es basen únicament en la força exercida per la gravetat. Aquesta força genera pressions operatives baixes, fet que provoca que el seu ús a escala industrial estigui limitat. Per contra, aquests filtres són senzills i econòmics i solen ser utilitzats per realitzar filtracions en el laboratori, on es tracten pocs volums i la velocitat de filtració no és important.

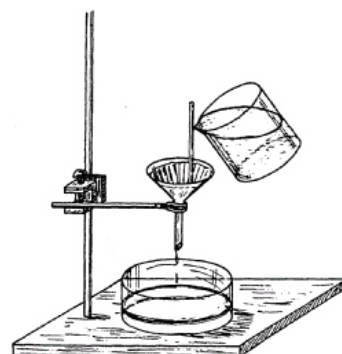


Fig 3.1 *Filtració per gravetat*

### 3.1.2 Filtració a pressió

Els més emprats són els filtres prensa que formen part dels filtres discontinus. Consisteixen en una sèrie de plaques i marcs alternats amb una tela filrant a cada costat de les plaques. Les plaques tenen unes incisions amb forma de canals per drenar el filtrat en cada placa.

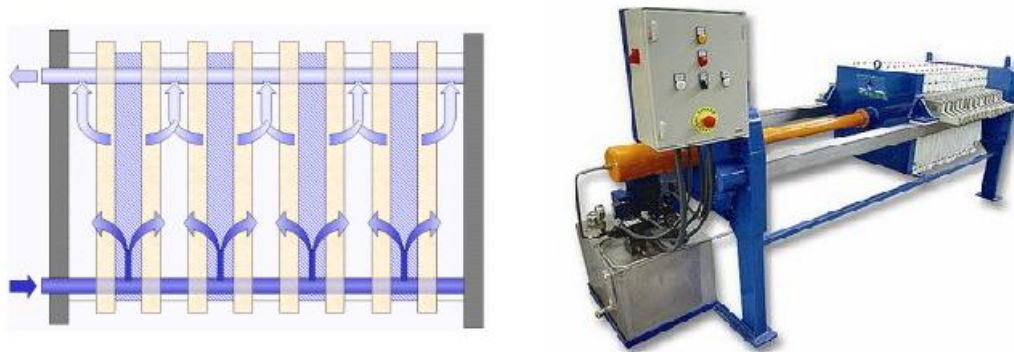


Fig 3.2 Filtre prensa.

### 3.1.3 Filtració al buit

Quan es treballa a nivell industrial, es requereix una producció constant. Aquest fet dificulta la filtració quan el líquid a filtrar conté una elevada quantitat de partícules sòlides. És per aquesta raó que es sol utilitzar un filtre rotatiu al buit ja que aquest conté un sistema que permet extreure contínuament el tortó de filtració que es va formant.

En aquest tipus de filtre, el fluid passa a través d'una tela cilíndrica rotatòria, on mitjançant un sistema mecànic es pot retirar el tortó format.

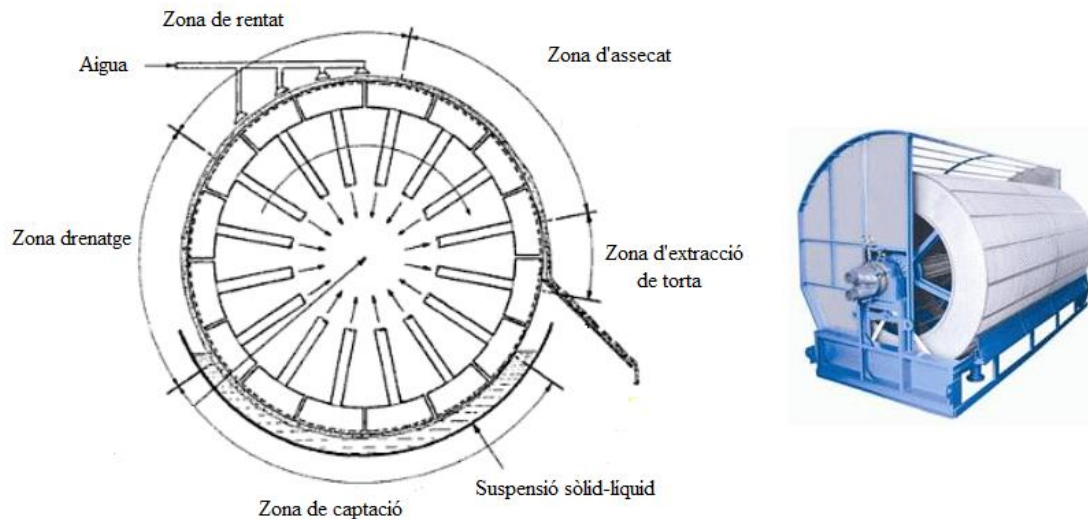


Fig 3.3 A l'esquerra secció transversal, a la dreta imatge real d'un filtre rotatori al buit

### 3.2 Problemes de la filtració actual

Mitjançant les tècniques comentades en l'apartat 3.1, es pot separar l'aigua continguda en forma lliure en la suspensió sòlid-líquid. Però què passa amb l'aigua adsorbida a la capa difusa, a la capa de Stern i l'aigua que hidrata els compostos?

Tal i com s'ha comentat a la introducció en una suspensió sòlid-líquid l'aigua es troba de quatre formes diferents:

- *Lliure*: Sense cap associació amb les partícules.
- *Lligada*: Associada a la partícula de tres possibles maneres:
  - Retinguda capil·larment en el sòlid.
  - Unida per ponts d'hidrogen a la superfície del sòlid.
  - Hidratant químicament la partícula sòlida.

Les tecnologies actuals basades en la compressió mecànica només poden extreure l'aigua lliure i l'aigua retinguda capil·larment. Per eliminar la resta de formes d'aigua s'han d'aplicar mètodes tèrmics, que comporten grans inversions de capital i elevats costos d'operació.

En nombroses aplicacions industrials en les que es requereix obtenir un sòlid amb un contingut baix de líquid, és molt important reduir el màxim possible el contingut de líquid per tal de reduir les despeses provocades pel consum energia a l'hora de portar

el sòlid a assecar mitjançant tractament tèrmic. Més endavant s'estudia i es demostra que mitjançant l'electro-filtració es pot eliminar una major quantitat d'aigua gràcies a l'efecte electroosmòtic, que permet filtrar l'aigua continguda en la capa difusa.

Un altre problema que afronten les tècniques actuals de filtració és que per a partícules molt fines, com per exemple els fangs, es formen uns tortons molt espessos amb unes resistències a la filtració elevades. Aquest fet que provoca que les velocitats de filtració disminueixin i els costos augmentin.

## CAPITOL 4 : ELECTRO-FILTRACIÓ

### 4.1 Teoria

L'electro-filtració es planteja com una tècnica que permet obtenir uns majors rendiments en la filtració. Està fonamentada en els efectes electrocinètics comentats anteriorment, prenent una especial importància l'electroforesi i l'electroosmosi.

El principi bàsic consisteix en aplicar un camp elèctric en la suspensió mitjançant dos elèctrodes alimentats amb corrent continua, de tal manera que les partícules sòlides, la majoria de les quals tenen càrrega negativa, siguin atretes pel pol positiu (ànode). D'aquesta manera s'aconsegueix disminuir la formació de tortó en una de les cares del filtre, es disminueix la resistència específica del tortó i com a resultat s'obté una major velocitat de filtració. Aquest fenomen s'explica millor en l'apartat 4.3. Filtres electro-cinètics a pressió dissenyats fins l'actualitat

A més a més degut a l'efecte de l'electroosmosi s'obté un segon cabal anomenat cabal electroosmòtic que es suma al cabal de filtrat obtingut per l'acció de la pressió en el filtre. Per tant, aquest efecte contribueix també a l'augment de la velocitat de filtració.

No obstant, no tots els efectes desencadenats per l'aplicació del camp elèctric són positius. Les reaccions electrolítiques que es desencadenen, comporten variacions del pH de la mostra al produir-se  $H^+$  i  $OH^-$ . A més a més, l'electròlisi produeix  $H_2$  i  $O_2$ , que al ser gasos no conductors de l'electricitat, augmenten la resistència i disminueixen la intensitat del camp elèctric. La producció d' $H_2$ , per la seva elevada inflamabilitat, pot ser perillosa. Però si és treballant amb petites quantitats, tenint una bona ventilació serà suficient.

Un altre efecte que comporta la circulació d'intensitat a través dels elèctrodes en contacte amb el líquid, és l'augment de temperatura. Aquest augment de temperatura té una part positiva, ja que disminueix la viscositat del líquid i per tant augmenta la velocitat de filtració. La part negativa és que la temperatura és considerada un contaminant, per tant el filtrat s'haurà de refredar.

## **4.2 Antecedents (experiències realitzades en electro-filtració)**

Nombrosos estudis basats en la filtració electrocinètica s'han realitzat fins l'actualitat. Com es comentava a la introducció, la majoria d'aquests estudis han estat centrats en la filtració de fangs de depuradora i principalment s'han centrat en l'efecte de l'electroosmosi, tot i que també s'ha experimentat amb altres suspensions i amb altres tècniques, com per exemple l'aplicació d'ultrasons. A continuació s'enumeren i s'expliquen breument alguns d'aquests estudis.

Al 1984 Heath i Demirel [1] van investigar la filtració electroosmòtica a pressió de suspensions de carbó. Van demostrar que la combinació d'un camp elèctric amb la pressió incrementaven el cabal de filtrat en comparació amb la filtració a pressió sola. Van demostrar també que l'electro-filtració podia ser millorada modificant el valor del potencial zeta utilitzant additius químics com polielectrolits i sufactants.

Al 1992 Golla [4] va dissenyar un filtre electroacústic, aplicant una combinació de pressió mecànica, corrent elèctric i ultrasons. Els seus resultats van mostrar que el filtre podia extreure l'aigua dels fangs fins a un 50% de contingut en sòlids.

Al 1993 Yoshida [19] va demostrar que la filtració de suspensions argiloses de bentonita amb filtració al buit a 80 kPa podia ser millorada electroosmòticament aplicant un voltatge constant de 10 V. Els seus resultats indicaven que la combinació de la filtració al buit i l'aplicació del camp elèctric milloraven el cabal de filtrat i la concentració de sòlids en la torta de filtració.

Al 1994 Gazbar [20] va construir una electro-filtre de laboratori amb pressió ajustable fins a 686 kPa. Els seus experiments van mostrar que aplicant un camp elèctric, l'efecte de l'electroosmosi permetia arribar a unes concentracions elevades de sòlids del 50,9% en comparació amb les tortes obtingudes sense aplicar corrent i a la mateixa pressió.

Al 1998 Banerjee i Law [21] van investigar la filtració electroosmòtica a voltatge i corrent constant de dos suspensions amb elevat contingut de biomassa: humus orgànic amb turba i fangs de depuradora. Les seves investigacions van demostrar que l'electroosmosi provocava unes millores en la filtració.

Al 1999 Barton [22] va demostrar a nivell de laboratori que la filtració a pressió convencional podia ser millorada aplicant un camp elèctric especialment per suspensions difícils de filtrar com fangs de depuradora. En els assajos aplicant el



camp elèctric van obtenir tortes de filtració amb un contingut de sòlids entre 35-46 % millorant el 24-30 % que obtenien utilitzant filtració per pressió tradicional.

Al 1999 Gingerich [5] va estudiar la filtració de fangs de depuradora en condicions aeròbiques i anaeròbiques aplicant pressió i corrent continua al filtre simultàniament. Van demostrar que el contingut final de sòlids podia ser augmentat fins al 50% amb l'aplicació de 60 V als fangs conjuntament amb l'aplicació d'una pressió sobre la mostra.

Al 2001 Hansen [23] va demostrar l'aplicació de l'electroosmosi per assecat 4 tipus de material; guix, hidròxid de ferro, cendres i biomassa rica en enzims. En els experiments, el contingut de sòlids de la suspensió de guix va passar del 40 al 79%, la d'hidròxid de ferro del 2,7 al 19%, les cendres del 75 al 82% i la biomassa del 3 al 33%.

Al 2001 Zhou [24] va proposar un model de filtració de fangs utilitzant un camp elèctric horitzontal per tal de facilitar la dissipació dels gasos produïts al elèctrodes degut a l'electròlisi i mantenir l'ànode constantment envoltat d'aigua.

### **4.3 Filtres electrocinètics a pressió dissenyats fins l'actualitat**

A continuació s'explica breuement en què consisteixen els electro-filtres dissenyats fins l'actualitat a nivell de laboratori, que són de dos tipus: d'una cara o de dues cares de filtració. Per a cada cas es desenvolupen les fórmules que governen la filtració en cada cas. En l'apartat 4.3.3, es fa menció a l'electro-filtre comercial de la casa OVIVO, empresa amb més de 200 anys d'experiència en el tractament d'aigües de depuradora i és una de les poques marques que ha comercialitzat aquesta tècnica.

#### *4.3.1 Electro-filtre d'una cara*

Els filtres d'una sola cara són els tradicionalment emprats en els laboratoris per realitzar filtracions. Per explicar en què consisteix aquest filtre es farà referència a investigacions realitzades per Weber i Stahl [8] on van dissenyar un electro-filtre a pressió d'una sola cara en el qual la pressió era exercida mitjançant un pistó. El dispositiu comptava amb l'ànode en la part superior del filtre i el càtode en la inferior.

En el cas ideal, degut a l'electroforesi, les partícules negatives atretes per l'ànode s'haurien de dipositar totes en la part superior del filtre de tal manera que no es formés torta en la part inferior i s'obtingués una velocitat major de filtració. En la realitat això no succeeix i es forma una petita torta en la superfície del medi filtrant, degut a la precipitació de partícules per l'efecte de la pressió, però de gruix inferior a la torta que es formaria si no s'apliqués el camp elèctric.

A més a més degut a l'electroosmosi, s'obté un cabal electroosmòtic que es suma al cabal propi de la filtració per pressió.

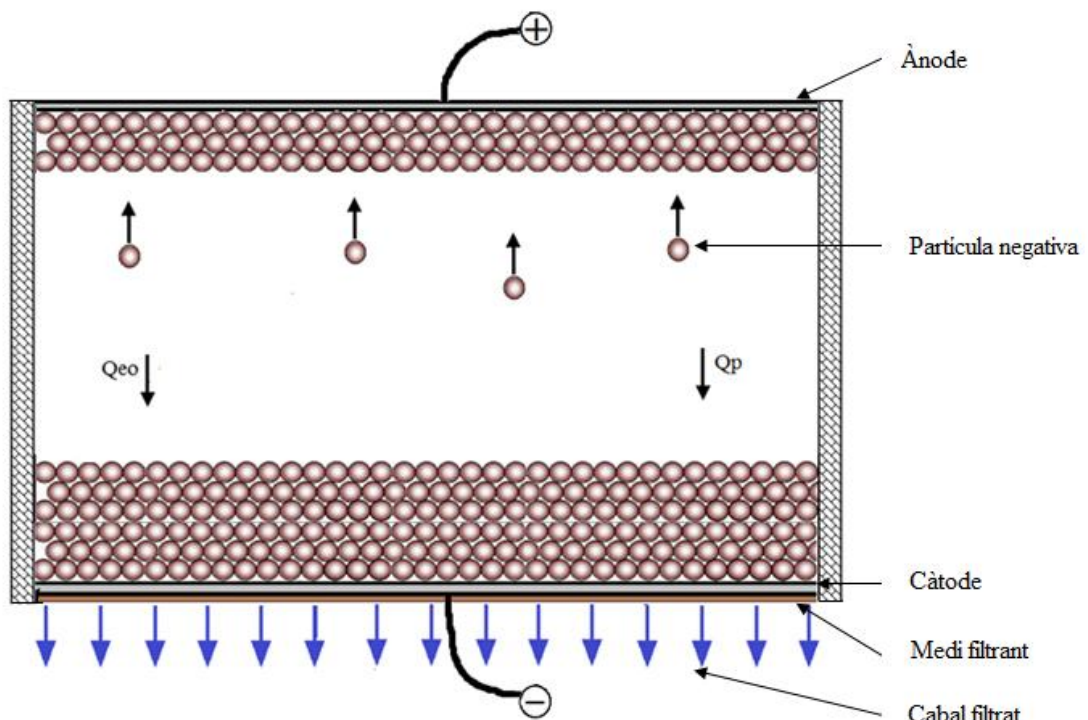


Fig 4.1 Esquema del moviment de partícules negatives en un filtre d'una cara.

Amb aquestes consideracions, es pot concloure que teòricament la velocitat i el rendiment de la filtració augmenta, tal i com van demostrar Weber i Stahl en els seus estudis.

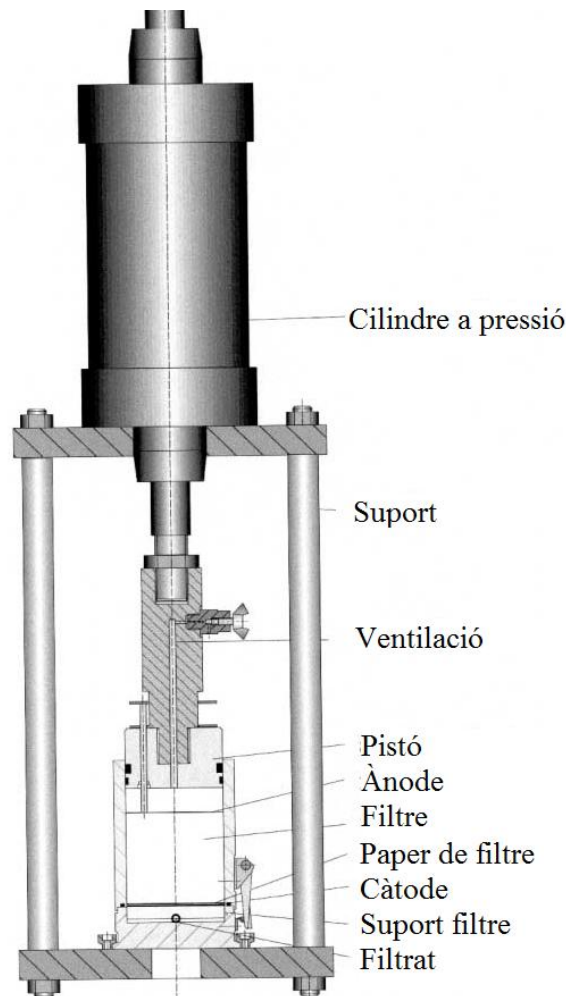


Fig 4.2 Esquema filtre d'una cara (Weber i Stahl 2002).

Per analitzar el comportament matemàtic d'aquesta filtració Webber i Stahl [8] fan referència a un dels estudis electrocinètics desenvolupat per Yukawa al 1975 [10], on l'electro-filtració es contempla com la superposició d'una pressió electroosmòtica addicional a la pressió hidràulica. Quan el camp elèctric aplicat arriba a un valor crític, s'igualen la velocitat de filtració i la velocitat d'electroforesi, donant com a resultat una suspensió on les partícules es troben en un estat estacionari, la velocitat de les quals és nul·la i no es forma més torta de filtració.

Segons la llei de Darcy, el cabal obeeix a un model de dues resistències, la torta i el medi filtrant. L'equació de Darcy modificada per tenir en compte l'efecte de l'electroosmosi i l'electroforesi és:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A}{\mu \left( r_c \cdot \kappa \cdot \left( \frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \frac{V}{A} + R_m \right)} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\Delta P_E = L \cdot E \quad (\text{Eq. 4.2})$$

on  $L$  és el coeficient d'electroosmosi (funció del potencial  $z$ , de la mida de partícula i de la constant dielèctrica)

$$\kappa = \frac{c_v}{1 - c_v - \varepsilon} \quad \text{Factor de concentració, adimensional} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\left( \frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \quad \text{Coeficient electroforètic} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$E_{cr} = \frac{J}{\psi} \quad \text{Camp elèctric crític} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Separant variables per integrar, l'equació queda

$$dt = \frac{\mu \cdot r_c \cdot \kappa \cdot \left( \frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \cdot V}{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A^2} dV + \frac{\eta \cdot R_m}{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A} dV \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Suposant que els coeficients són constants, integrant s'obté una relació lineal entre  $V$  i  $t/V$ .

$$\int_0^t dt = \int_0^V \frac{\mu \cdot r_c \cdot \kappa \cdot \left( \frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right) \cdot V}{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A^2} dV + \int_0^V \frac{\mu \cdot R_m}{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A} dV \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \cdot r_c \cdot \kappa \cdot \left( \frac{E_{cr} - E}{E_{cr}} \right)}{2 \cdot (\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A^2} V + \frac{\mu \cdot R_m}{(\Delta P_H + \Delta P_E) \cdot A} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Per al càlcul de la pressió electroosmòtica a partir del resultats experimentals, s'ha d'emprar la següent equació .

$$\Delta P_E = \Delta P_H \times \frac{Q_{eo}}{Q_p} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

#### 4.3.2 Electro-filtre de dues cares

Aquest tipus d'electro-filtres s'aproximen més a l'aplicació real emprada en la indústria, concretament els filtres premsa. Al 2002, Weber i Stahl [11] van desenvolupar un model teòric per descriure l'electro-filtració a dues cares, basat en el model de Yukawa. Van dissenyar un filtre, l'estructura del qual estava coberta per un filtre en dos dels seus costats. En una cara es situava l'ànode i en l'altre el càtode, ambdós alimentats amb corrent continua per tal de crear un camp elèctric durant la filtració. Aquest fet implicava que es creaven dos cabals de filtració, un per l'ànode i un altre pel càtode.

Degut al moviment electroforètic, les partícules sòlides (majoritàriament negatives) es dipositen en l'ànode reduint la formació de torta al càtode. Per tant, la resistència específica al càtode disminueix i s'augmenta a l'ànode, donant lloc a un major cabal pel càtode i un menor cabal per l'ànode.

L'efecte de l'electroosmosi també és present i si es pren com a referència que les partícules tenen càrrega negativa, s'obtindrà un cabal electroosmòtic que es sumarà al càtode i un cabal electroosmòtic que es restarà a l'ànode.

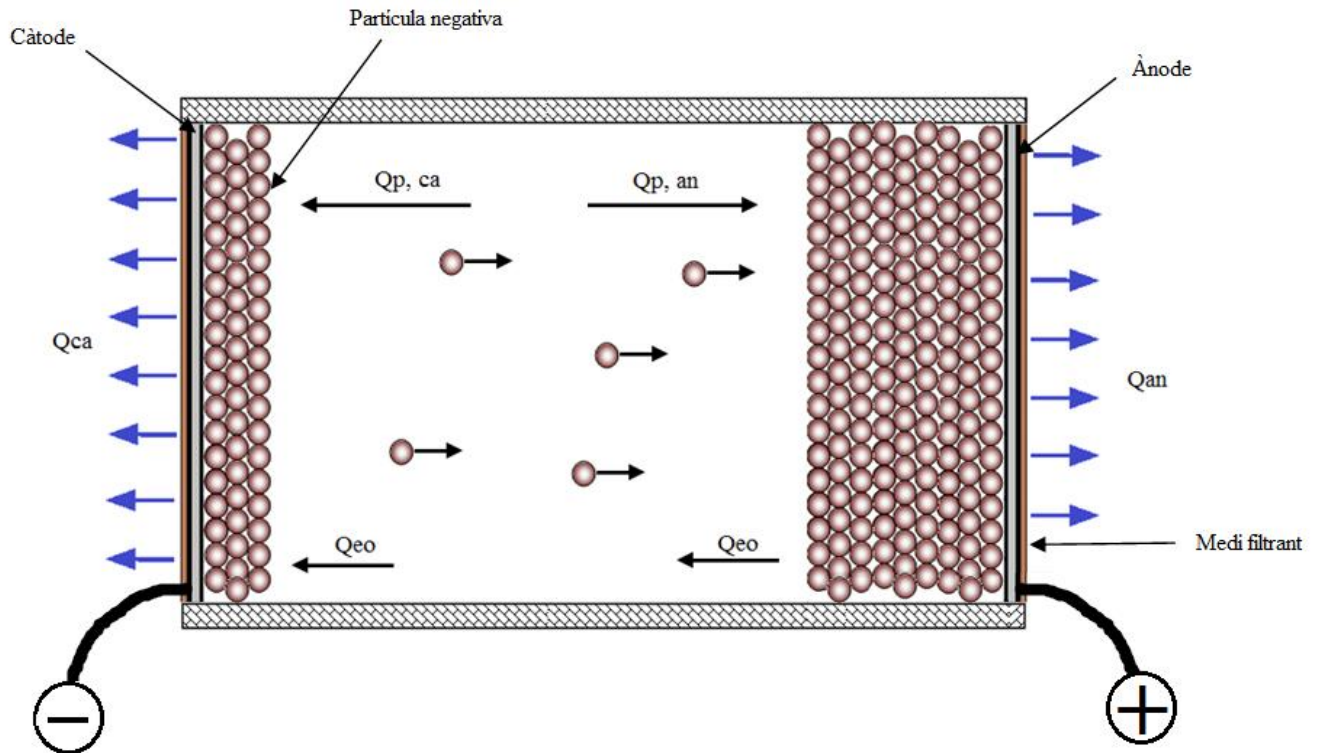


Fig 4.3 Esquema del moviment de partícules negatives en una filtració a dues cares.

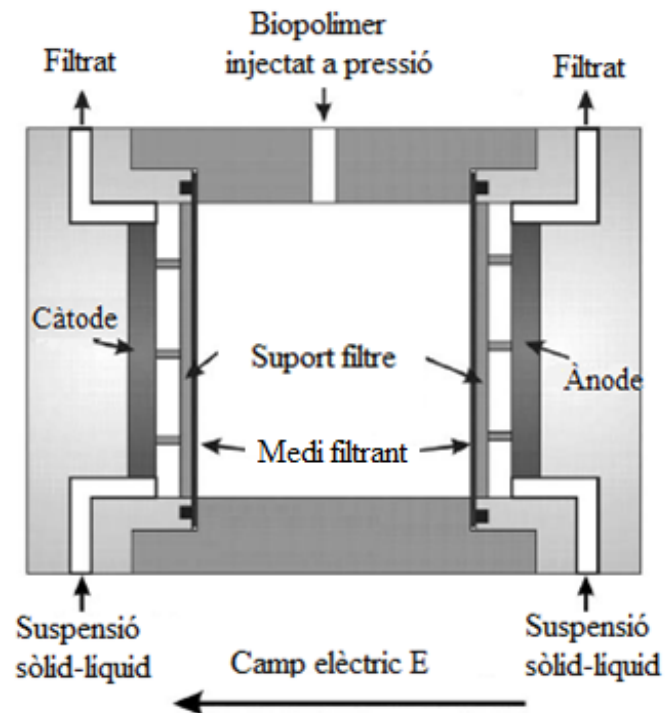


Fig 4.4 Esquema filtre dues cares. En aquest cas la pressió la dona la injecció d'un biopolímer a pressió.

Després de realitzar nombrosos experiments, van demostrar que tot i que el cabal a l'ànode es disminuïa i augmentava al càtode, s'obtenien millores aplicant un camp elèctric en comparació amb la filtració a pressió convencional.

A continuació es mostren les fórmules finals per calcular el cabal a l'ànode i al càtode. No s'aprofundeix en el tractament matemàtic, ja que aquest tipus de filtració a dues cares no és la que es tracta en aquest projecte.

$$Q_{ca} = \left(\frac{dV_{ca}}{dt}\right) = Q_{p,ca} + Q_{eo} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot (r_c \cdot v \cdot \left(\frac{V_{ca}}{A} + \frac{1}{1+v} \cdot \frac{D \cdot \varepsilon_0 \cdot \zeta}{\mu} \cdot E \cdot t\right) + R_t)} - \psi \cdot E \cdot \varepsilon_c \cdot A \quad (\text{Eq. 4.11})$$

$$Q_{an} = \left(\frac{dV_{an}}{dt}\right) = Q_{p,an} - Q_{eo} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot (r_c \cdot v \cdot \left(\frac{V_{an}}{A} + \frac{1}{1+v} \cdot \frac{D \cdot \varepsilon_0 \cdot \zeta}{\mu} \cdot E \cdot t\right) + R_t)} + \psi \cdot E \cdot \varepsilon_c \cdot A \quad (\text{Eq. 4.12})$$

On:

$$\psi = \frac{D \cdot \varepsilon_0 \cdot \zeta}{\mu} \quad (\text{depèn del valor del potencial zeta}) \quad (\text{Eq. 4.13})$$

#### 4.3.3 Electro-filtre CINETIK®

L'electro-filtre Cinetik (veure catàleg ANNEX apartat 3.5) es presenta com una solució adaptable per millorar l'eficiència energètica de les extraccions d'aigua de residus provinents de fangs industrials, municipals o agrícoles.

Consisteix en un filtre premsa al qual se li ha incorporat el procés d'electro-filtració. Aquest fenomen s'aconsegueix aplicant pressió i descàrregues elèctriques de corrent contínua que generen un camp elèctric a una cinta (que actua com a medi filtrant) per la qual circula el fang i és suportada per una estructura metàl·lica. Aquest camp elèctric induïx el fenomen electroosmòtic a través dels porus i permet una major extracció d'aigua del fang.

Aquest electro-filtre és de 3 a 5 vegades més eficient energèticament que els filtres premsa tradicionals, ja que redueix el contingut d'aigua a ser eliminada amb tractament tèrmic i aconseguix reduir el volum d'aigua



Fig 4.5 Electro-filtre Cinetik.

residual entre un 50 i un 75%. Les característiques més importants d'aquest equip són les següents:

- Completament automatitzat.
- Control precís de tots els paràmetres en tot moment.
- Adequació del sistema segons les característiques del fang.
- Ajustament per obtenir les característiques desitjades del fang residu.
- Possibilitat d'integració amb l'equipament existent.
- Despeses de manteniment baixes.

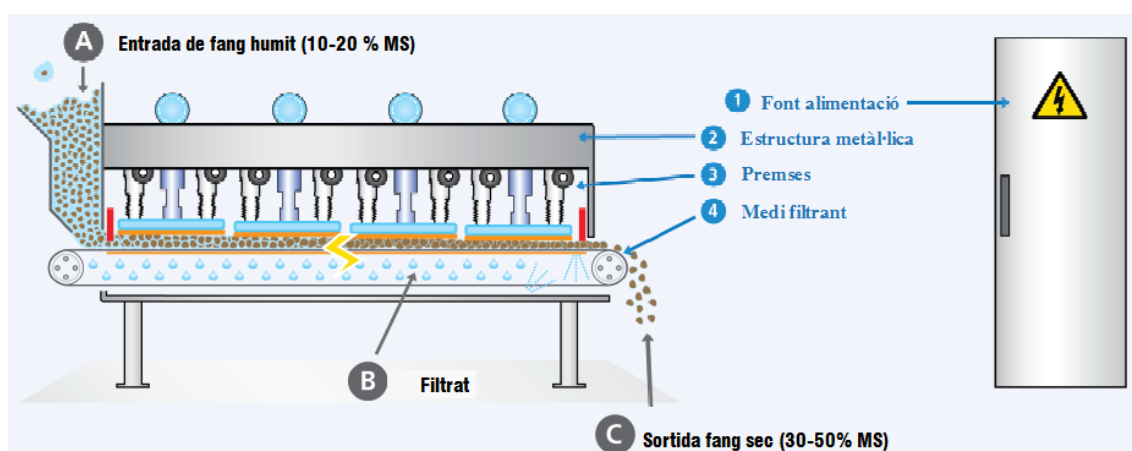


Fig 4.6 Esquema electro-filtre Cinetik.



## CAPITOL 5: DISSENY PILOT D'UN ELECTROFILTRE

### 5.1 Introducció

Un cop coneguda la teoria que envolta el procés d'electro-filtració i les experiències realitzades fins al moment en aquest camp, és moment de dissenyar l'electro-filtre (a escala de laboratori) que permetrà realitzar les experimentacions i comprovar si aquesta nova tècnica té majors rendiments que les filtracions a pressió actuals.

La idea principal és dissenyar un filtre a pressió al qual se li apliqui un camp elèctric mitjançant la connexió de dos elèctrodes a una font d'alimentació. El filtre serà d'una sola cara per tant es recollirà la mostra filtrada per la part inferior tal i com es mostra en la figura 5.1.

Les parts més complicades a tenir en compte a l'hora de realitzar el projecte són les següents:

- Aplicació de pressió al filtre.
- Agitació de la mostra.
- Creació del camp elèctric.
- Selecció dels elèctrodes.
- Selecció del medi filtrant.

Es realitza el projecte a partir d'un pressupost de 120 € per comprar materials. Es disposa d'una font d'alimentació, un agitador magnètic i una balança electrònica facilitats per la UdG que hauran d'esser retornats un cop finalitzat el projecte. Les experimentacions es realitzen en el laboratori d'Enginyeria Paperera del grup d'investigació LEPAMAP [45].

Inicialment degut a que no es disposa de cap referència i no es sap si el camp elèctric serà suficient, quina pressió s'haurà d'aplicar, quin material d'elèctrodes serà necessari, etc., es tendeix a fer el muntatge el més senzill i econòmic possible, per tal de situar-se i tenir algun valor de referència. Més tard, si el muntatge no satisfà les necessitats requerides pel procés es realitzaran les modificacions pertinents.

## 5.2 Descripció de l'equip

Després d'analitzar diverses alternatives, l'opció més viable econòmicament és la de dissenyar un electro-filtre al que se li apliqui la pressió mitjançant aire comprimit. Per tant s'haurà de muntar un sistema que sigui estanc per tal de no perdre pressió ni mostra.

En aquest apartat es mostra el diagrama de blocs de l'electro-filtre, les parts fonamentals del muntatge, el diagrama de l'equip i finalment es fa una breu descripció de cada part que conforma el sistema.

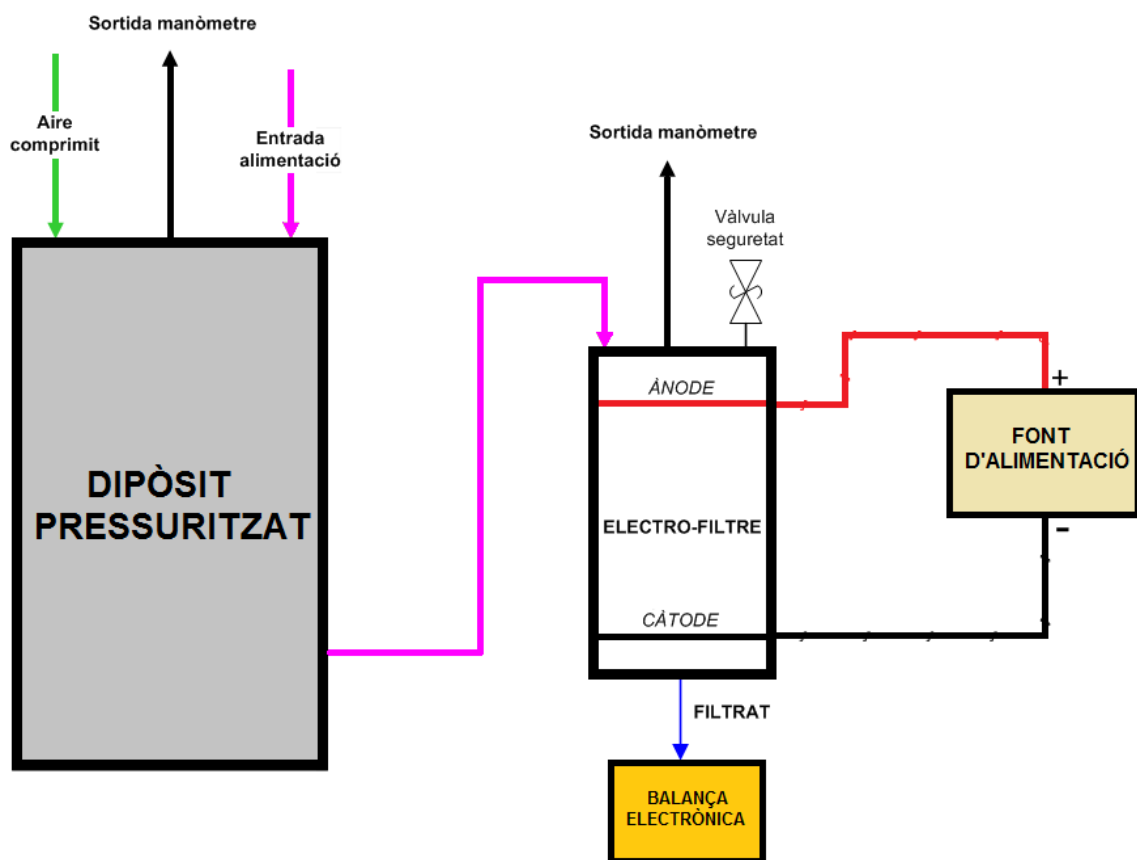


Fig 5.1 Diagrama de blocs de l'electro-filtre muntat al laboratori.

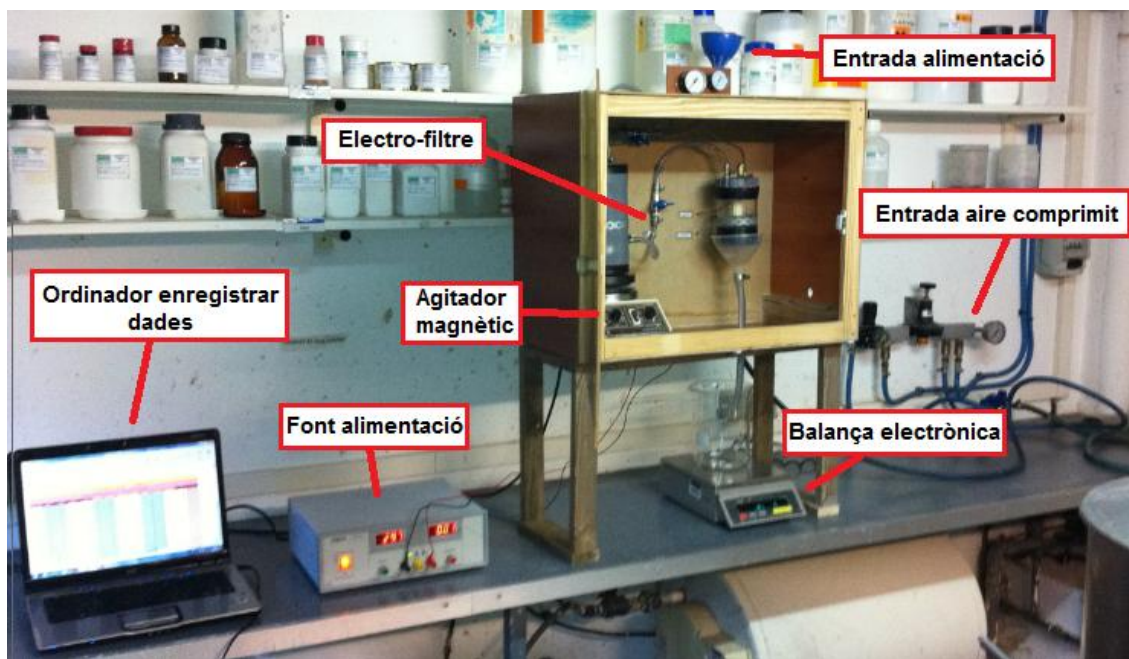


Fig 5.2 Muntatge de l'equip al laboratori.

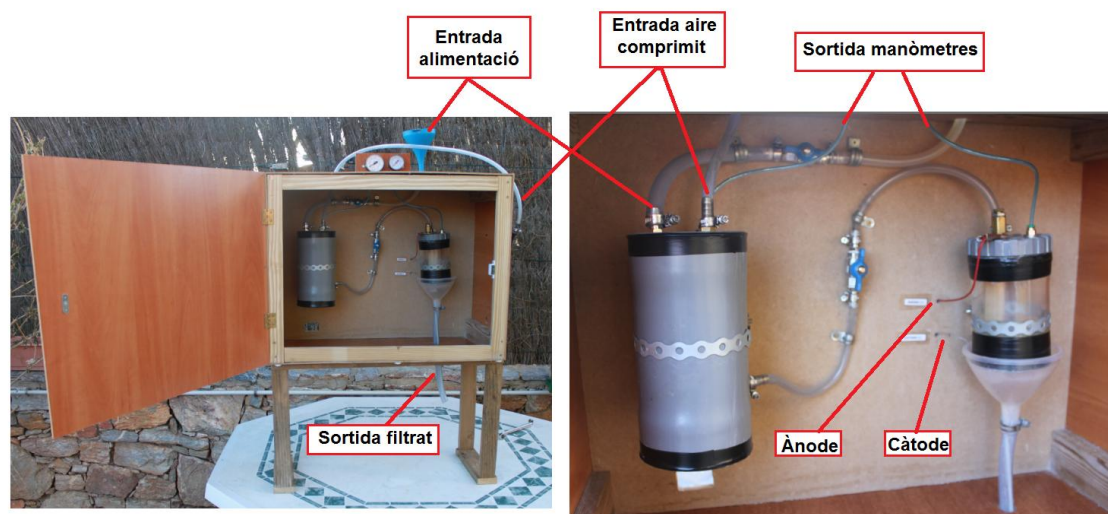
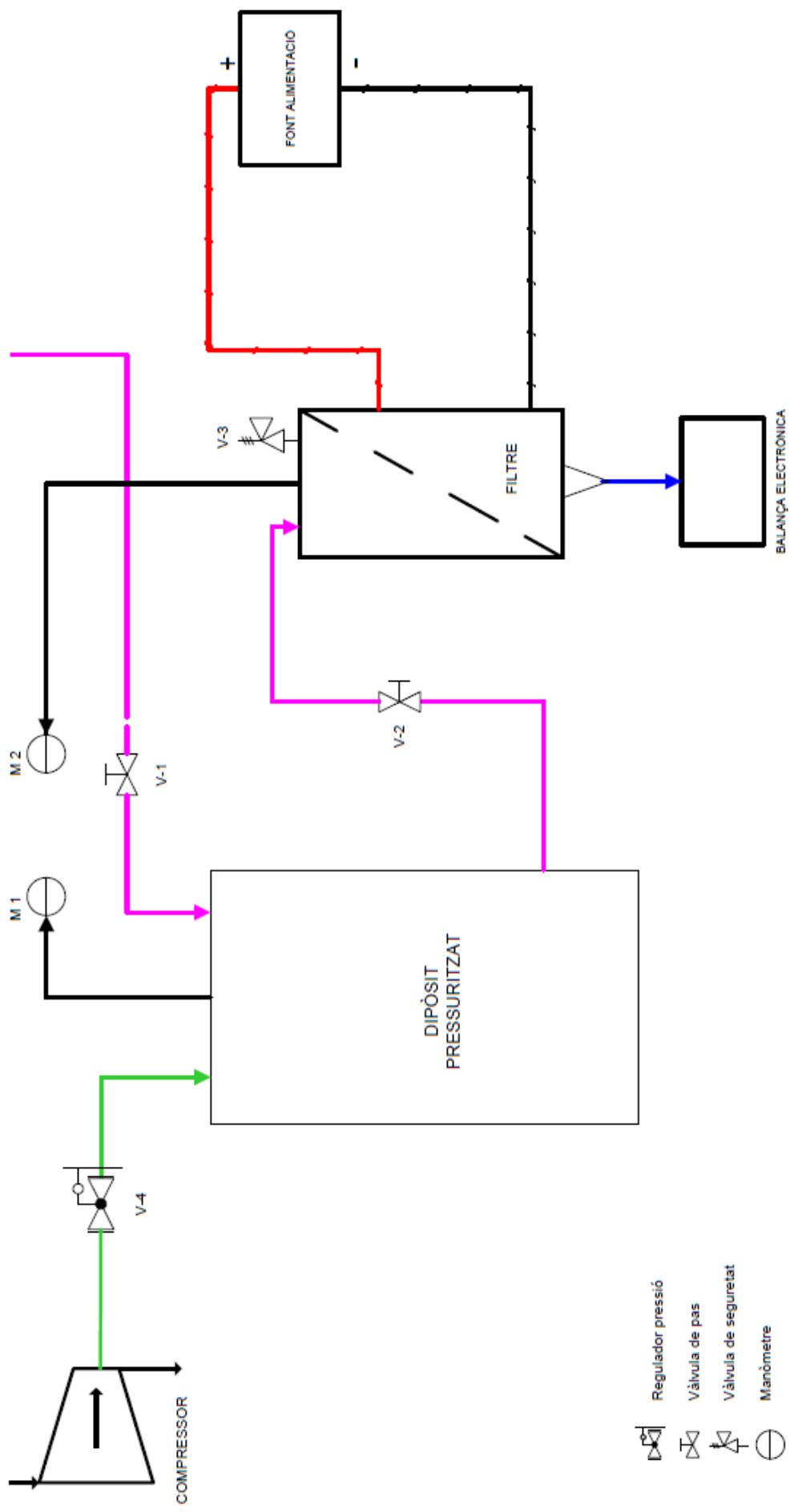


Fig 5.3 Parts de l'equip.

A continuació es detalla el diagrama de l'equip.



- Regulator pressió
- Vàlvula de pas
- Vàlvula de seguretat
- Manòmetre
- Alimentació
- Aire comprimit
- Filtrat
- Aire a pressió
- Connexió ànode
- Connexió càtode

 UOg Universitat de Girona		PROJECTE FINAL DE CARRERA	
		Diagrama d'equips	
TAMAIG: A4	CODIGO Nº: EF-1	PLANO Nº: A-100	REV: 1
ESCALA: 1:1	FULL	1 de 1	
Nom: David Martínez Capilla		Data: 20/03/12	

A continuació s'explica amb més detall les principals parts de l'electro-filtre:

- *Caixa de presentació*

Es prepara una caixa de fusta on s'acoblarà l'electro-filtre. La caixa està reforçada per la part superior amb una malla metàl·lica. Per la part superior té un forat per l'entrada de l'alimentació, un forat per l'entrada d'aire comprimit i dos forats més per la sortida de les connexions dels manòmetres. Per la part inferior té un altre forat per la sortida del filtrat. Per la part posterior hi ha tres perforacions: una per la connexió de l'agitador i les dues restants per la connexió de l'ànode i el càtode amb la font d'alimentació.

La subjecció del dipòsit pressuritzat i de l'electro-filtre es realitza mitjançant una cadena metàl·lica suportada per un cargol i tancada mitjançant una palometa.



Fig 5.4 Caixa presentació electro-filtre.

- *Sistema de pressió*

La pressió es proporciona mitjançant aire comprimit. El laboratori on es realitzaran les proves amb l'electro-filtre està equipat amb un regulador d'aire comprimit que permet obtenir aire a pressió exacta entre 0 i 2,5 bars. Per tant és una manera senzilla d'obtenir pressió en el filtre. La pressió es pot controlar amb el regulador i comprovar amb els dos manòmetres instal·lats: un al dipòsit pressuritzat i l'altre a l'electro-filtre.

El funcionament és el següent: s'introdueix aire a pressió al dipòsit pressuritzat on es troba la mostra de tal manera que quan s'obre la vàlvula 2, instal·lada entre el dipòsit i el filtre, la mostra entra a la pressió desitjada al filtre. Simplement s'ha de tenir en compte que tot el sistema ha de ser estanc per tal de mantenir la pressió i que no es perdi mostra.



Fig 5.5 Regulador de pressió.



Fig 5.6 Manòmetres.



- *Dipòsit pressuritzat*

S'encolen dos taps cecs de PVC a 31,5 cm de tub de PVC de 110 mitjançant cola d'unió d'alta resistència. La pressió de resistència que garanteix el fabricant és de 10 bars. Per la part superior del dipòsit hi ha una entrada per l'aire comprimit, una entrada per l'alimentació de la mostra i una sortida al manòmetre. Per la part lateral inferior hi ha una sortida de la mostra cap a l'electro-filtre. S'introdueix un imant recobert de plàstic per tal d'agitar la mostra amb l'agitador magnètic.

Cal destacar que el ràcord d'entrada de la mostra és d'una mida superior als altres ràcords del muntatge, per tal de poder netejar el dipòsit amb més facilitat.

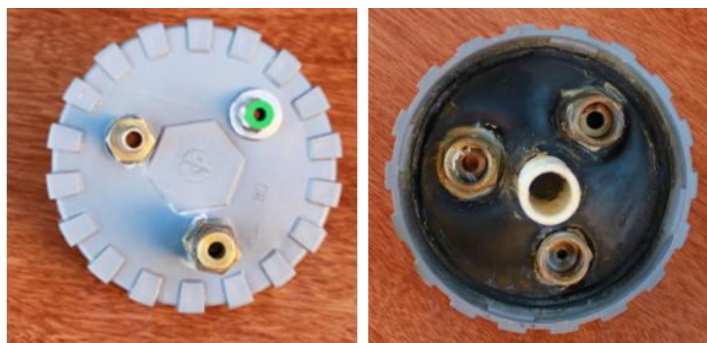


Fig 5.7 Dipòsit pressuritzat. A l'esquerra sense encolar. A la dreta encolat.

- *Electro-filtre*

Per tal de crear un filtre estanc i aïllat, s'encola un tap cec i un tap de registre de PVC a 12 cm de tub de metacrilat de 90 mm. Es fa ús del color transparent del metacrilat per tal d'observar que succeeix en tot moment dins de l'electro-filtre. En aquest cas, el tap de registre de PVC no és un element dissenyat per aguantar pressions, per tant el fabricant no pot garantir quina pressió màxima pot aguantar aquest tap. Inicialment tot i aquesta limitació es decideix continuar amb aquesta opció ja que és senzilla de muntar, econòmica i permetrà situar-se en les necessitats del projecte. Un cop muntada es comprova quina pressió màxima suporta el muntatge.

Abans de comprovar la pressió que suporta, degut a que com s'ha comentat el tap de registre no és un element de pressió, la junta tòrica que porta no farà estanquitat. Per tant es dissenya i es construeix una junta a mesura tal i com es mostra en la imatge i mitjançant silicona s'acobla a l'interior del tap de registre. Un cop acoblada aquesta junta i donant unes voltes de tefló a la rosca, s'aconsegueix la estanquitat del filtre.



*Fig 5.8 A l'esquerra part superior del tap de registre. A la dreta part interior on s'observa la junta acoblada per crear l'estanquitat.*

Per determinar la pressió que aguanta la rosca del tap de registre es munta l'electro-filtre en la caixa de presentació degudament reforçada per suportar cops i s'aplica pressió fins que aquesta venç la rosca. Després de varies repeticions es determina que la pressió màxima que pot suportar és de 1,5 bars. Per seguretat es treballarà amb un valor màxim de pressió d'1 bar i si aquest valor no fos suficient, com s'ha comentat en la introducció, es realitzarien les modificacions pertinents.

Per la part superior de l'electro-filtre hi ha l'entrada d'alimentació provinent del dipòsit pressuritzat, una sortida cap al manòmetre i una vàlvula de seguretat que es

regularà perquè s'accióni quan s'arriba a 1 bar de pressió. A part de protegir d'un possible error en el regulador de pressió, no cal oblidar que dins de l'electro-filtre es produirà l'electròlisi de l'aigua i per tant s'alliberaran gasos. Encara que es preveu que la quantitat de gas generada serà molt petita, la vàlvula controlarà aquesta possible variació de pressió a l'interior del filtre.

Del tap de registre surt un tub de PVC que farà de suport de l'ànode. Per la part inferior, encolat en la part superior del tap cec, hi ha un cercle perforat de PVC al qual se li ha encolat un disc d'alumini també perforat de 85 mm de diàmetre i 1 mm de gruix que farà de càtode. Al tap cec, per la part inferior, se li han fet 5 forats per permetre la sortida del filtrat.



Fig 5.9 Cercle de PVC del tap cec (suport càtode) abans de ser perforat.



Fig 5.10 A l'esquerra electro-filtre muntat. A la dreta, desmuntat.

- *Conducció de l'alimentació i filtrat*

La conducció de l'alimentació al dipòsit pressuritzat es realitza mitjançant mànega de PVC transparent de  $\text{Øint}=12$  mm i  $\text{Øext}=16$  mm de diàmetre. S'instal·la una clau de pas per tal de mantenir la pressió en el dipòsit un cop s'obri l'aire comprimit.

Per conduir l'alimentació del dipòsit al filtre també es fa ús d'una mànega de PVC però de  $\text{Øint}=8$  mm i  $\text{Øext}=10$  mm. Es col·loca una clau de pas entremig del dipòsit i el filtre.

Per tal de recollir el filtrat, s'acobla un embut connectat a una mànega de PVC de  $\text{Øint}=14$  mm i  $\text{Øext}=18$  mm a la part inferior del filtre, que condueix la mostra a un



recipient tarat sobre la balança electrònica que permetrà el càlcul de la quantitat de filtrat obtinguda amb el temps.



Fig 5.11 A l'esquerra clau de pas amb les espigues per acoblar la mànega. A la dreta mànega de PVC transparent.

- *Elèctrodes*

Després de comprovar que l'ànode es descompon i s'oxida amb més facilitat que el càtode es decideix construir els dos elèctrodes de material diferent.

Per l'ànode, es compra reixeta d'acer per tal de poder ser tallada a mida i ser substituït cada cop que es descompongui o es faci malbé. Pel càtode s'acobra un disc d'alumini perforat en la part inferior del filtre.

Com que el diàmetre del filtre és de 90 mm, es tallen elèctrodes de 85 mm de diàmetre per garantir un camp elèctric constant i poder ser introduïts en l'interior del filtre sense dificultats.

El càtode es col·locarà en la part inferior del filtre i com s'ha comentat abans es recolzarà sobre la superfície de PVC perforada especialment dissenyada. Per contra s'ha de muntar un sistema que mantingui l'ànode en la part superior i que pugui variar la distància respecte el càtode, per tal d'apropar-lo o allunyar-lo i aconseguir major o menor intensitat de camp elèctric. Per aconseguir-ho s'encola una barra de plàstic en el tap de registre. Sobre aquesta barra de plàstic fixa s'acoblarà una altra barra de plàstic de diàmetre superior que serà la que marcarà la distància entre ànode i càtode i on l'ànode anirà fixat mitjançant fil d'acer.



Fig 5.12 En la imatge s'observa la barra de plàstic fixa i la barra de plàstic de diàmetre superior movable.

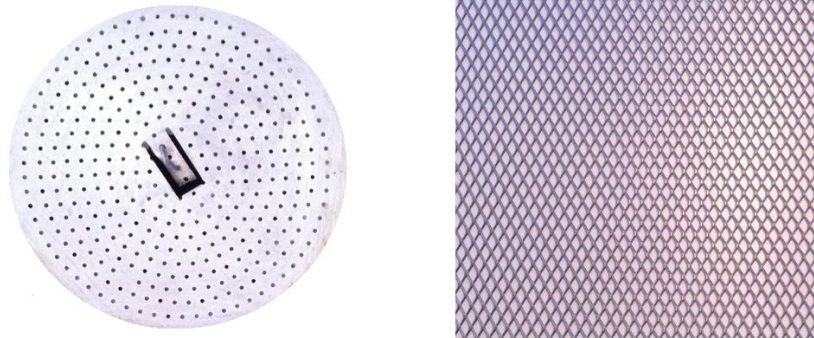


Fig 5.13 A l'esquerra disc d'alumini perforat (càtode). A la dreta reixeta d'acer (ànode).

- *Font d'alimentació*

S'utilitza la font d'alimentació model GVD305 de la casa Grelco . Aquesta font permet regular el voltatge que s'aplica entre valors de 0 a 30 V i té una intensitat màxima de sortida de 5 A i una potència de 150 W.

Amb l'objectiu de preveure reaccions secundàries o descomposicions dels metalls degut a l'electròlisi, es minimitza el nombre de metalls que estaran en contacte amb l'aigua i l'electricitat a tres: acer, llautó i alumini. Així doncs, les connexions d'electricitat interiors es realitzaran amb cablejat d'acer.

Per tal de no perdre l'estanquitat del filtre, aprofitant que la vàlvula de seguretat és de llautó i és un material que condueix l'electricitat, la connexió de la font d'alimentació a l'ànode es fa indirectament mitjançant unes pinces connectades a la vàlvula de seguretat i aquesta connectada a l'ànode mitjançant fil d'acer.

Per contra, la connexió amb el càtode es fa directa, ja que a la part inferior del filtre hi ha uns forats per on surt el filtrat que s'aprofiten per fer passar fil d'acer que s'empalma al càtode i al cable elèctric que connecta el càtode a la font d'alimentació.

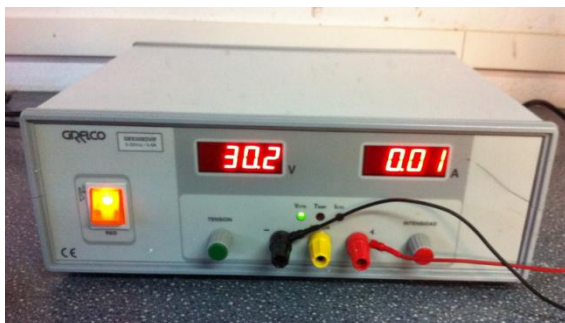


Fig 5.14 A l'esquerra font d'alimentació. A la dreta connexió de l'ànode i del càtode amb la font d'alimentació.

- *Medi filtrant*

Amb l'objectiu de treballar en condicions semblants a la indústria, el medi filtrant haurà de ser una tela filtrant industrial que suporti la pressió. La tela filtrant escollida té les següents característiques:

<b>Tela</b>	PAM-95150-AM
<b>Fils/passades</b>	54 x 37
<b>Composició</b>	Poliamida 11 monofilament
<b>Pes (g/m<sup>2</sup>)</b>	180 ± 20
<b>Permeabilitat (l/min·dm<sup>2</sup>)</b>	134 – 300

Taula 5.1 Característiques medi filtrant



Fig 5.15 Tela filtrant

Després de nombroses experimentacions, es comprova que la possible colmatació de la tela no afecta als resultats obtinguts. Per tant netejant el medi filtrant amb aigua a pressió és suficient i la tela no ha de ser substituïda. L'única consideració a tenir en compte és la col·locació del medi filtrant en posició correcta, ja que com s'observa a la Fig 5.15. per diferències en les característiques de cada cara de la tela, s'especifica quina és la cara en la que s'ha de dipositar el tortó.

Per tal d'evitar el moviment del medi filtrant al introduir l'alimentació a pressió, es construeix una junta tòrica de 90 mm de diàmetre exterior i 85 mm de diàmetre interior que es col·locarà a la part superior del medi filtrant tal i com mostra la Fig. 5.16



Fig 5.16 Vista en planta de l'electro-filtre. S'observa el càtode, medi filtrant i junta de goma.

- *Agitació de la mostra*

L'agitació de la mostra és realitza mitjançant un agitador magnètic model Agimatic N de la marca Selecta que manté la mostra del dipòsit pressuritzat constantment agitada gràcies a l'iman que hi ha en l'interior d'aquest. La potència d'aquest agitador és de 35 W amb un màxim de 1600 rpm.



Fig 5.17 Agitador magnètic.

- *Balança per calcular el filtrat*

Es disposa d'una balança electrònica de la marca COBOS, model D-6000 que permet pesar de 0 a 6000 g amb una precisió de 0,1 g, per tal d'obtenir un control exacte del pes de filtrat. Llavors, mitjançant el factor de conversió corresponent entre pes i densitat del filtrat es calcularà el volum.

Les dades obtingudes s'enregistraran manualment en un ordinador.



Fig 5.18 Balança electrònica

### 5.3 Detall despeses instal·lació

Les despeses de la instal·lació es divideixen en dos. Per una banda el cost de la instal·lació del filtre a pressió convencional i per l'altra el cost addicional per tenir l'electro-filtre a pressió. Finalment es sumen els dos costos i s'obté el preu final de la instal·lació de l'electro-filtre.

Tal i com s'ha comentat el l'apartat introductori, la font d'alimentació, compressor, balança electrònica, agitador magnètic i ordinador no es contemplen en els costos de l'equip ja que estan presents en les instal·lacions del laboratori i es pot fer ús d'ells.

El cost total de la instal·lació és de 172,23 €, sobrepassant un 44,35 % el pressupost inicial marcat de 120 € i és detallat en la taula 5.2.

MATERIAL COMÚ FILTRACIÓ A PRESSIÓ I ELECTRO-FILTRACIÓ					
Concepte	Característiques	Distribuïdor	Quantitat	Preu unitari	Preu
Fustes caixa presentació		CIFEC	1	45	45
Tub metacrilat	90x120	SERVEI ESTACIÓ	1	3,38	3,38
Tub PVC gris	110x1000	GASULL	1	9,55	9,55
Tap registre PVC	90	GASULL	1	4,02	4,02
Tap cec PVC	90	GASULL	1	1,68	1,68
Tap cec PVC	110	SANILEC CABALLÉ	2	2,29	4,58
Ràcord mascle	1/4"	CIFEC	4	2,3	9,2
Vàlvula seguretat	1/4" (0,5-5)	TRACTO-BRAVA	1	5,9	5,9
Ràcord femella manòmetre metàl·lic	1/4"	TRANS-FLUID	2	2,13	4,26
Planxa PVC escumat	45x45	GASULL	1	1,9	1,9
Reducció hexagonal	1/4"-3/8"	SANILEC CABALLÉ	7	1,58	11,06
Junta sintètica ampla	3/4"	SANILEC CABALLÉ	5	0,08	0,4
Junta goma	20x10x2	SERVEI ESTACIÓ	1	2,7	2,7
Vàlvula palometa llautó	1/4"	TRANS-FLUID	2	3	6
Espiga mànega llautó	1/4" Ø10	TRANS-FLUID	4	0,83	3,32
Mànega PVC transparent	14x18	CIFEC	1	0,89	0,89
Mànega PVC transparent	12x16	CIFEC	1	1,16	1,16
Mànega PVC transparent	8x10	TRANS-FLUID	1	1,43	1,43
Mànega poliuretà aire comprimit	2,5x4mm	TRANS-FLUID	1	0,44	0,44
Manòmetre 6 bar (80 psi)	1/8" Ø50	TRANS-FLUID	1	8,06	8,06
Manòmetre 6 bar (80 psi)	1/8" Ø40	TRANS-FLUID	1	5,90	5,90
Embut		CIFEC	1	2	2
Silenciador cadira blanc		CIFEC	6	0,1835	1,10
Abraçadora TSF ASFA-L	8-12	CIFEC	6	0,3509	2,10
Cargol papallona zinc	M-6	CIFEC	2	0,078	0,15
Frontisses MALAX	40x35	CIFEC	2	1,22	2,44
Pom fusta		CIFEC	1	0,53	0,53
Planxa PVC escumat	2x45x45	GASULL	1	1,90	1,90
Varis muntatge		CIFEC			15
				<b>TOTAL</b>	<b>155,1 €</b>

MATERIAL COMÚ FILTRACIÓ A PRESSIÓ I ELECTRO-FILTRACIÓ					
Concepte	Característiques	Distribuïdor	Quantitat	Preu unitari	Preu
Reixeta acer	50x20	CIFEC	1	6,13	6,13
Làmina alumini	Ø 85	CIFEC	1	6	6
Cables elèctrics	Ø 2	CIFEC	2	3	6
				<b>TOTAL</b>	<b>18,13 €</b>

<b>TOTAL ELECTRO-FILTRE</b>	<b>173,23 €</b>
-----------------------------	-----------------

Taula 5.2 Detall despeses instal·lació electro-filtre.

## CAPITOL 6: DISSENY EXPERIMENTAL: MOSTREIG I METODOLOGIA

### 6.1 Introducció

En el següent apartat s'explica com s'han realitzat les experimentacions i el mostreig de les mostres amb les que s'experimentarà, per tal de comprovar la viabilitat del sistema, evidenciar els seus efectes i posteriorment entendre els resultats i discussions comentats en el següent capítol.

Amb l'objectiu de demostrar si l'aplicació d'un camp elèctric sobre la filtració a pressió tradicional provoca els efectes teòricament estudiats, es realitzen dos tipus de prova a partir d'una suspensió sòlid-líquid de pols de vidre ( $\text{SiO}_2$ ) en aigua. Per una banda s'analitza si el temps de filtració es redueix i per l'altra si el contingut d'aigua del tortó format també es veu disminuït al aplicar el camp elèctric. A més a més s'analitza l'evolució de les característiques del filtrat per tal d'observar si aquest varia amb el temps o no.

Un cop realitzades aquestes experimentacions amb la pols de vidre es realitzen assajos amb altres tipus de substàncies (puré de patata, concentrat de verdures i ciment) per observar si l'influència del camp elèctric té efectes en les característiques de la mostra, amb l'objectiu de determinar si aquest procediment pot ser aplicat en processos on interessa reduir el contingut d'aigua sense alterar les propietats de la mostra o si per contra, només pot ser aplicat en aquells processos on el tortó format sigui un rebuig o les seves característiques puguin ser alterades.

### 6.2 Mostreig

#### 6.2.1 *Pols de vidre*

La mostra s'obté d'una cristalleria situada al polígon industrial de Palafrugell. La pols de vidre inicialment es troba formant una pasta espessa amb aigua, ja que aquesta pols és recollida mitjançant aigua i portada a un sistema col·lector on un cop ple es porta el residu a l'abocador pertinent.

La mostra a més de pols de vidre conté petites traces de PVC i alumini, ja que són els materials amb els que treballen en aquesta cristalleria. Les operacions de mostreig

realitzades per tal d'obtenir una substància en forma de pols fina homogènia són les següents:

- Trituració de la mostra.
- Dilució de la mostra en aigua.
- Filtració per eliminar les partícules més grans d'un pas de llum de 1 mm<sup>2</sup>.
- Decantacions per tal d'eliminar les impureses de PVC, alumini o partícules de vidre més grans i obtenir una suspensió d'aigua amb la pols de vidre dissolta el més pura possible.
- Precipitació de la mostra.
- Decantació.
- Dessecació de la mostra en l'estufa 24 h a 105°C.
- Trituració de la mostra seca.
- Tamisatge de la mostra.

Un cop obtinguts uns 15 Kg de mostra, es guarden en recipients tancats en un lloc sec.



*Fig 6.1 Sistema col·lector de la pols de vidre.*



*Fig 6.2 A l'esquerra pols de vidre original, a la dreta pols de vidre després del mostreig.*

Es mesura la densitat aparent del sòlid i s'obté un valor de 1,98 g/cc.

L'anàlisi del diàmetre mig de partícules mitjançant un Sedigraph determina que les partícules de la mostra tenen un diàmetre mig de 2,34 µm. La corba obtinguda és la següent.

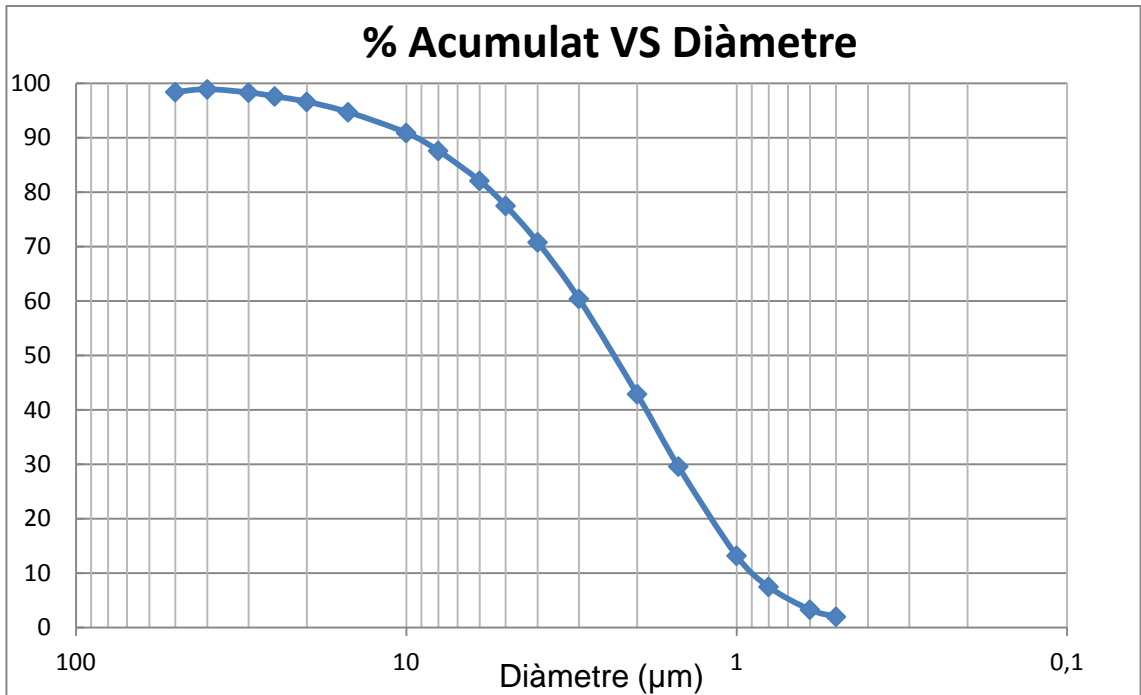


Fig 6.3 Gràfica % acumulat enfront del diàmetre obtinguda amb el Sedigraph.

### 6.2.2 Puré de patata, concentrat de verdures i ciment

Aquestes mostres es compren directament. El ciment i el puré de patata es troben en estat pols per tant no s'ha d'aplicar cap tractament. El concentrat de verdures es troba en forma de pastilles de 10 g que es dissolen perfectament en aigua, per tant tampoc s'haurà d'aplicar cap tractament previ.



Fig 6.4 D'esquerra a dreta: puré de patata, concentrat de verdures i ciment.



### 6.3 Experimentacions amb la pols de vidre variant la intensitat de camp elèctric

#### 6.3.1 Introducció

Dins d'aquest apartat es divideixen les experimentacions en dos blocs. Per una banda es realitzen les experimentacions variant el valor del voltatge (0, 10, 20 i 30 V). Per l'altra i degut a que la font d'alimentació que crea el camp elèctric té un valor màxim de 30V, es manté el valor del voltatge a 30 V i es varia la conductivitat de la mostra afegint NaCl amb l'objectiu d'incrementar la conductivitat i consegüentment la intensitat del camp elèctric i veure els efectes que té.

En cada bloc d'experimentacions es realitzen les dues proves esmentades anteriorment: variació del temps de filtració i variació del % de matèria sòlida obtinguda en el tortó.

La taula 6.1 resumeix les experimentacions realitzades dins d'aquest apartat:

<b>BLOC 1: VARIACIÓ VOLTATGE</b>		<b>BLOC 2: VARIACIÓ %NaCl, VARIACIÓ DE LA CONDUCTIVITAT</b>	
<b>Valors Voltatge</b>	0V, 10V, 20V, 30V	<b>Valors % NaCl</b>	0,056%, 0,17%, 0,45% En totes V= 30 V
<b>PROVES REALITZADES</b>	Variació volum filtrat	<b>PROVES REALITZADES</b>	Variació volum filtrat
	Variació % MS tortó		Variació % MS tortó

Taula 6.1 Detall experimentacions realitzades.

El valor de la pressió es fixa a 0,4 bars i és el mateix per a totes les experimentacions.

Degut a l'oxidació de l'acer, l'ànode es canvia cada 20 experimentacions, mentre que el càtode no es canvia en tot el procés ja que no es descompon. El medi filtrant tampoc es canvia degut a que no s'observen efectes produïts per una possible colmatació de la tela filtrant.

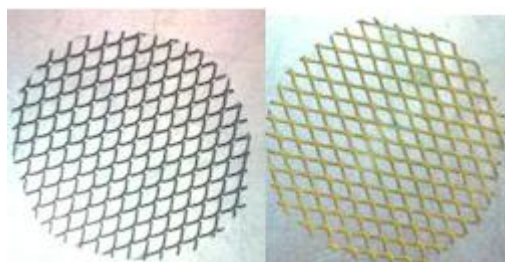


Fig 6.5 A l'esquerra ànode original, a la dreta ànode oxidat després de 20 experimentacions.

### 6.3.2 Variacions en el temps de filtració

El procediment a realitzar serà el mateix per al Bloc 1 i al Bloc 2, l'únic que variarà serà les característiques de la mostra. Per al Bloc 1 s'utilitza una suspensió del 7% de



Fig 6.5 Equip emprat per l'experimentació.

pols de vidre. Per al Bloc 2 també s'utilitza una suspensió del 7% en pols de vidre a la que se li afegeix NaCl per tal d'obtenir la concentració marcada en cada cas i variar així la conductivitat de la mostra. La separació entre elèctrodes es fixa a 3 cm.

Degut a les possibles variacions a l'hora d'obrir manualment la vàlvula per començar a filtrar i altres, es repeteixen 3 vegades les experimentacions per a cada cas i es calcula la mitjana posteriorment.

La taula 6.2 resumeix les condicions aplicades a cada cas.

Experimentació	BLOC 1				BLOC 2		
	1	2	3	4	1	2	3
Volum de mostra(ml)	1643	1643	1643	1643	1643	1643	1643
% pols de vidre	7	7	7	7	7	7	7
grams pols vidre	124	124	124	124	124	124	124
% NaCl	0	0	0	0	0,056	0,17	0,45
grams NaCl	0	0	0	0	1	3	8
Voltatge (V)	0	10	20	30	30	30	30
Repeticions	3	3	3	3	2	2	2

Taula 6.2 Detall condicions per a cada experimentació.

A continuació es detallen els passos a seguir per tal de realitzar l'experimentació.

1. Preparar 1643 ml de mostra i homogeneïtzar-la 30 segons amb un batidor.
2. Regular el valor del voltatge de la font d'alimentació.
3. Regular el valor de la pressió a 0,4 bars.
4. Tancar la vàlvula 2 i desconnectar el tub del manòmetre 1.
5. Obrir la vàlvula 1 i omplir el dipòsit pressuritzat amb la mostra.
6. Encendre l'agitador magnètic.
7. Tancar la vàlvula 1 i connectar novament el manòmetre 1.

8. Connectar les pinces a la vàlvula de seguretat per tal de alimentar amb corrent l'ànode.
9. Connectar l'ànode i el càtode a la font d'alimentació.
10. Obrir la vàlvula 4 per obrir l'entrada d'aire comprimit.
11. Encendre la balança electrònica i tarar el vas de precipitats on es recollirà el filtrat.
12. Obrir la vàlvula 2 i activar el cronòmetre. Aquesta vàlvula s'ha d'obrir progressivament per tal d'evitar que la pressió mogui el medi filtrant.
13. Als 15 segons encendre la font d'alimentació prèviament regulada al voltatge corresponent.
14. Realitzar anotacions de la intensitat i pes del filtrat obtingut cada 30 segons els primers tres minuts i llavors cada minut fins arribar a un volum de filtrat de 1000 g.
15. Un cop terminada la filtració: tancar la vàlvula 4, obrir la vàlvula 1 per descomprimir el filtre i el dipòsit i netejar l'equip desmuntant-lo de els fixacions.
16. Mitjançant la densitat del filtrat, aplicar el factor de conversió per passar de massa a volum de filtrat.

Es realitza el mateix procediment variant els valors del voltatge en el Bloc 1 i del % de NaCl en el Bloc 2.

### 6.3.3 Variacions en el % de matèria sòlida obtingut del tortó

En aquest cas es prepara una dissolució al 14,5% en pols de vidre. Per al Bloc 2 s'afegeixen els grams necessaris de NaCl per obtenir el % desitjat. Per dur a terme aquesta experimentació, l'alimentació de la mostra s'entra directament al filtre, sense passar pel dipòsit pressuritzat. Per tal de garantir un contacte constant de la mostra amb l'ànode i el càtode i garantir l'efecte de l'electroosmosi durant tot el procés, la distància dels elèctrodes es redueix a 1,5 cm.



Fig 6.7 Equip emprat per l'experimentació

Les experimentacions es repeteixen dues vegades per a cada cas i posteriorment es calcula la mitjana.

La taula 6.3 resumeix les condicions aplicades a cada experimentació.

Experimentació	BLOC 1				BLOC 2		
	1	2	3	4	1	2	3
<b>Volum de mostra(ml)</b>	500	500	500	500	500	500	500
<b>% pols de vidre</b>	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
<b>grams pols vidre</b>	85	85	85	85	85	85	85
<b>% NaCl</b>	0	0	0	0	0,056	0,17	0,45
<b>grams NaCl</b>	0	0	0	0	0,33	1	2,64
<b>Voltatge (V)</b>	0	10	20	30	30	30	30
<b>Repeticions</b>	2	2	2	2	2	2	2

Taula 6.3 Detall condicions per a cada experimentació.

A continuació es detallen també els passos a seguir per realitzar aquesta experimentació.

1. Preparar 500 ml de dissolució i homogeneïtzar amb un batidor 30 segons.
2. Regular el valor del voltatge de la font d'alimentació.
3. Regular el valor de la pressió a 0,4 bars.
4. Obrir el filtre i abocar tota la mostra al seu interior. Degut a que no hi ha pressió aplicada, la mostra quedarà retinguda en el filtre gràcies a la presència del medi filtrant.
5. Tancar el filtre enroscant el tap de registre.
6. Connectar l'entrada d'aire comprimit al filtre directament i el manòmetre 2.
7. Fixar el filtre i col·locar un vas de precipitats per recollir el filtrat.
8. Connectar les pinces a la vàlvula de seguretat per tal de alimentar amb corrent l'ànode.
9. Connectar l'ànode i el càtode a la font d'alimentació.
10. Obrir la vàlvula 4 i activar el cronòmetre.
11. Als 15 segons encendre la font d'alimentació prèviament regulada al voltatge corresponent.
12. Deixar que filtri el temps necessari. El temps de funcionament serà el mateix per totes les repeticions i vindrà marcat per el temps necessari per extreure l'aigua continguda a la part superior del tortó quan el voltatge aplicat és de 0 i no hi ha presència de NaCl.
13. Mesurar el pes de les càpsules de porcellana rentades i seques.
14. Un cop terminada la filtració, extreure el tortó, col·locar-lo en la càpsula de porcellana.

15. Assecar a l'estufa 24 hores a 105 °C la càpsula de porcellana amb el tortó.
16. Retirar la càpsula de porcellana de l'estufa i posar-la en el dessecador per tal de refredar-la.
17. Pesar el pes de la càpsula de porcellana i el tortó sec.
18. Calcular el contingut de matèria seca del tortó format.

Per assecar les mostres es fa us del model d'estufa Conterm de la marca SELECTA [44].



Fig 6.8 Estufa

#### 6.3.4 Variació de les característiques del filtrat

Per tal d'analitzar com varien les característiques del filtrat es prenen mostres per intervals de temps. Per observar els efectes de les reaccions electroquímiques, s'analitza el pH i la conductivitat. Per determinar l'efecte de la intensitat s'avalua l'evolució de la temperatura, per acabar i determinar la qualitat del filtrat obtingut, s'analitza la terbolesa de les mostres de filtrat. Es treballa amb les mateixes condicions que l'apartat 6.3.3 volum de mostra de 1643, concentració del 7% en pols de vidre i novament s'afegeix la quantitat de NaCl necessària en els experiments del Bloc 2. La separació dels elèctrodes es fixa a 3 cm.



Fig 6.9 Equip emprat per les analítiques.

El procediment a seguir és el mateix que el de l'apartat 6.3.3 amb la diferència que en aquest cas no s'anota el pes de filtrat obtingut en cada temps, sinó que es prenen mostres del filtrat en el intervals de temps que es mostren a continuació i posteriorment s'analitzen en el laboratori. La mesura de la temperatura es realitza constantment sobre el filtrat i s'anota cada valor del temps mig marcat.

La taula 6.4 mostra els intervals de temps i els temps mitjos que es marquen per a les experimentacions de cada bloc.

BLOC 1			BLOC 2		
Mostra	Intervals	Temps mig (s)	Mostra	Intervals	Temps mig (s)
1	0-30 seg	15	1	0-30 seg	15
2	30 seg 1 min	45	2	30 seg 1 min	45
3	1 min 2 min	90	3	1 min 2 min	90
4	2 min 3 min	150	4	2 min 3 min	120
5	10 min 12 min	660	5	10 min 15 min	750
6	18 min- 20 min	1140			

Taula 6.4 Temps mitjos marcats per a cada bloc.

Per al Bloc 2 s'arriba a un temps de filtració de 15 minuts donat que la filtració és més ràpida que en Bloc 1.

Per realitzar les analítiques es fa ús dels següents instruments:

- Turbidímetre: LP-2000 de la marca HANNA [40]
- pH-metre: GLP-22 de la marca CRISON [41]
- Conductímetre: GLP-31 de la marca CRISON [42]
- Sonda de temperatura: 638 Pt de la marca CRISON [43]

#### 6.4 Experimentacions amb puré de patata, concentrat de verdures i ciment.

En aquest apartat s'opera de forma diferent per a cada tipus de substància. Amb les experimentacions amb pols de vidre s'observa que es produeix una destrucció de la mostra per l'oxidació de l'ànode i una alteració de les propietats per les reaccions electrolítiques. Per tant en aquest apartat es vol comprovar que l'efecte del camp elèctric provoca variacions en la mostra i que per tant aquesta tècnica no pot ser utilitzada si el que interessa obtenir de forma pura sense alteracions és el tortó de sòlids. L'objectiu és observar si es produeix una variació del pH i de l'aspecte visual de la mostra al aplicar el camp elèctric. Així doncs es prepara una suspensió amb la mostra, s'introdueix directament al filtre i es regula la pressió manualment a cada cas per obtenir un temps de filtració de 20 minuts. És a dir que la mostra estigui sota les influències del camp elèctric 20 minuts.



Fig 6.10 Experimentacions amb puré de patata

La distància dels elèctrodes es fixa a 1,5 cm i el valor del voltatge a 30V. La següent taula (6.5) mostra els paràmetres per a cada experimentació.

<b>Mostra</b>	<b>% concentració</b>	<b>P treball (bars)</b>	<b>Temps filtració (min)</b>
<b>Puré de patata</b>	3,10	0,25	20
<b>Concentrat de verdures</b>	1,88	0,15	20
<b>Ciment</b>	10,34	0,8	20

*Taula 6.5 Detall condicions de cada experimentació.*

Es preparen 780 ml de suspensió per a cada cas i es procedeix seguint els mateixos passos que a l'apartat 6.3.4.

Les experimentacions es repeteixen un sol cop per a cada cas. Un cop terminada la filtració, es dissol el tortó en la mateixa quantitat d'aigua inicial i s'analitza el pH de la mostra original i del tortó obtingut dissolt en aigua.

## CAPITOL 7: RESULTATS I DISCUSSIÓ

### 7.1 Efectes de la variació del camp elèctric. Experimentacions amb pols de vidre

Per començar es mostren els valors d'intensitats obtinguts al aplicar els diferents voltatges i diferents concentracions de NaCl sota la mostra de pols de vidre dissolt en aigua.

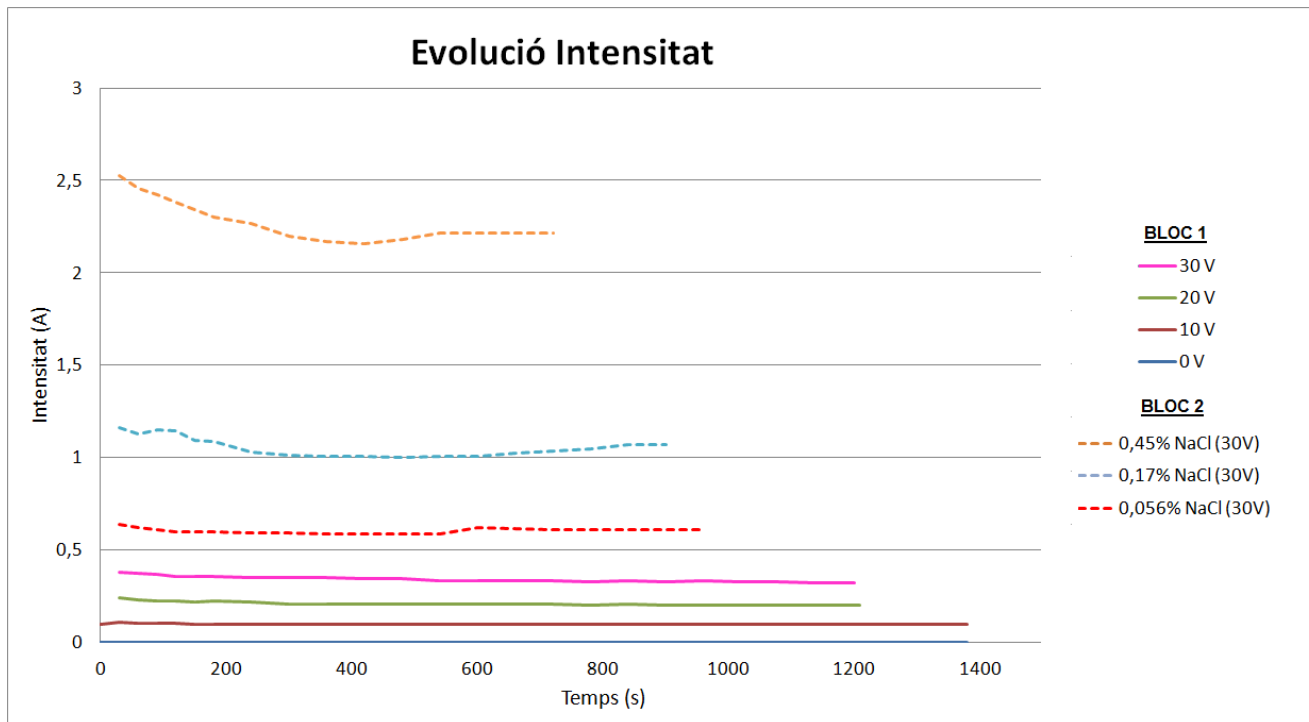


Fig 7.1 Evolució intensitat en l'electro-filtració.

Tal i com es mostra en la gràfica els valors oscil·len entre 0,10 A quan s'apliquen 10 V i 2,5 A quan s'apliquen 30 V amb un 0,45% en pes de NaCl. D'aquesta manera es pot concloure que el valor de la intensitat augmenta proporcionalment al valor del voltatge aplicat. Però l'efecte que té més importància i que provoca un augment més considerable de la intensitat és la conductivitat de la mostra: a més quantitat de NaCl afegida, més conductivitat i per tant més intensitat de camp elèctric.



## 7.1.1 Milllores en el temps de filtració

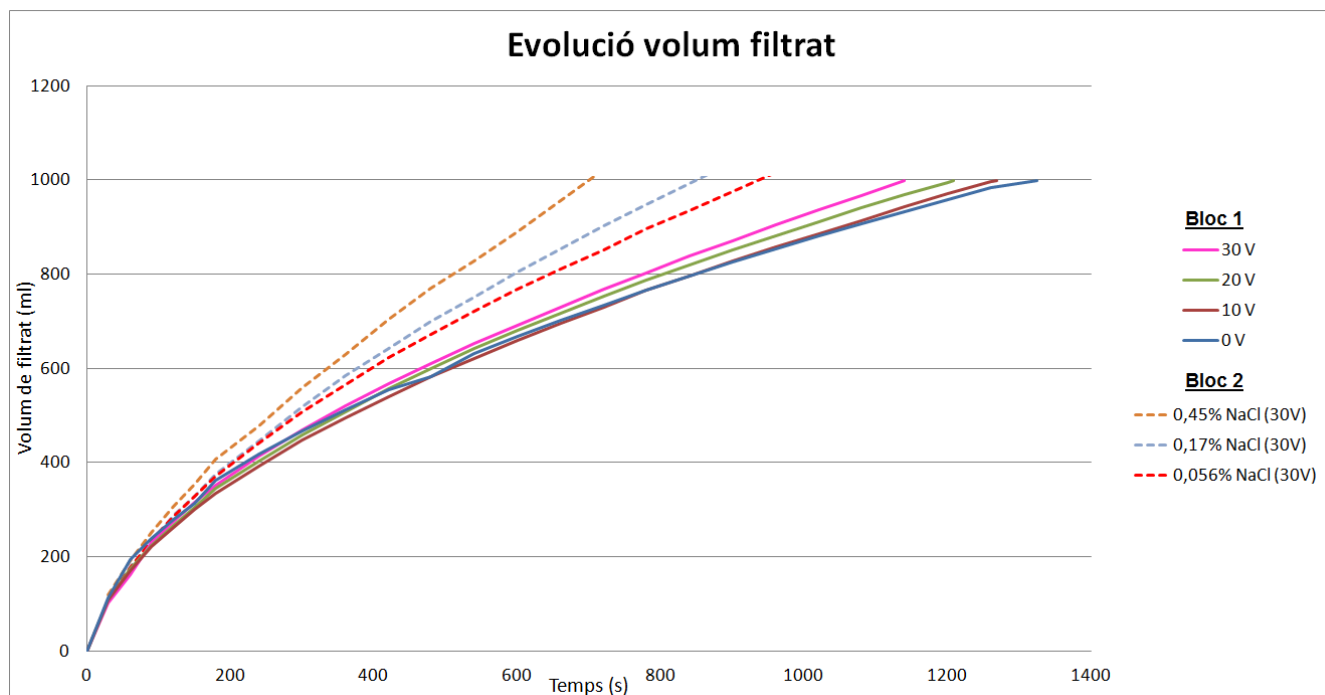


Fig 7.2 Evolució del volum de filtrat en l'electro-filtració.

Observant la gràfica es veu que per a les experimentacions del Bloc 1 el valor de volum de filtrat no difereix gaire al augmentar el voltatge. Els temps obtinguts per arribar a 1000 ml de filtrat oscil·len entre 1325 s (22 min i 5 s) per la filtració a pressió convencional amb 0 V i 1133 s (18 min i 53 s) quan s'apliquen 30 V.

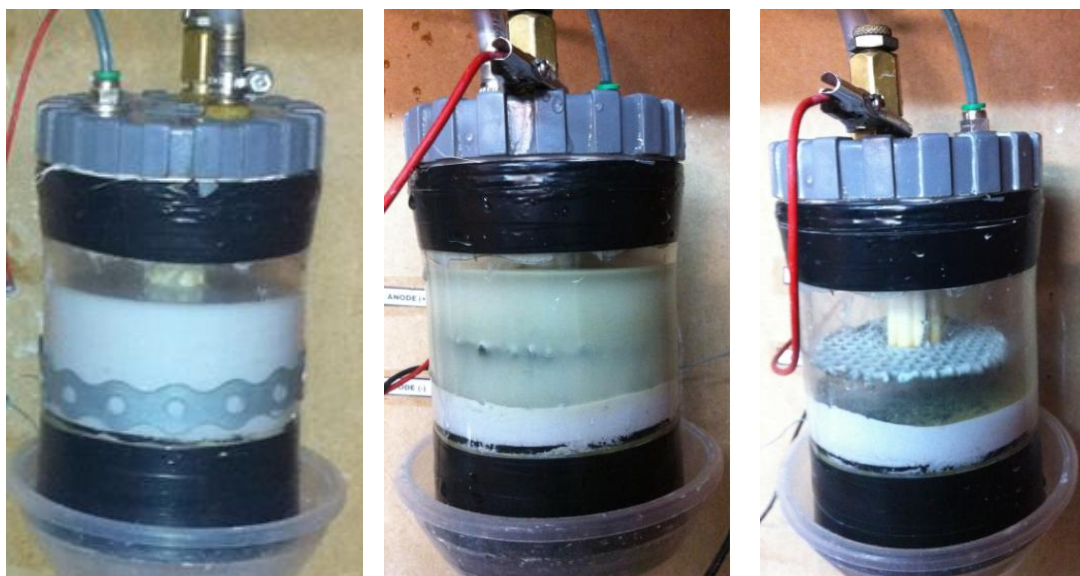
A mesura que augmenta el valor del voltatge aplicat, disminueix el temps necessari per filtrar un volum determinat, en aquest cas 1000 ml. Tot i que els resultats mostren una millora en el temps de filtració, es sospita que el valor de la intensitat no és suficientment elevat per provocar l'efecte de l'electroosmosi i l'electroforesi. És per aquesta raó que al Bloc 2 es treballa augmentant la conductivitat de la mostra per augmentar la intensitat de camp elèctric.

Observant els resultats obtinguts per al Bloc 2 s'observa que, efectivament, al augmentar la intensitat del camp elèctric, els efectes de l'electroforesi i electroosmosi es veuen incrementats i s'arriba a obtenir un temps de filtració per al cas 30 V i 0,45% de NaCl de 697 s (11 min i 37 s).

Per tant comparant els temps de filtració quan no s'aplica voltatge i el temps necessari quan s'apliquen 30 V i 0,45% de NaCl s'obté una reducció del 52,6 % en el

temps necessari per obtenir 1000 ml de filtrat. És a dir el temps de filtració per al cas on el camp elèctric creat és més elevat es veu reduït a aproximadament la meitat.

Els efectes de l'electroforesi només s'observen visualment en els experiments del Bloc 2 i el cas de 30 V del Bloc 1. Lògicament quan més gran és la intensitat del camp elèctric més formació de capa en l'ànode degut a l'electroforesi.



*Fig 7.3 Formació de capa per efecte de l'electroforesi. D'esquerra a dreta: (30V 0% NaCl), (30V 0,056% NaCl) i (30V 0,45% NaCl)*

La descomposició del elèctrodes també està influïda per la intensitat del camp elèctric. Aquesta descomposició només es dona en l'ànode degut a l'oxidació d'aquest i provoca la destrucció de la mostra tal i com es mostra en les Fig. 7.4 i Fig. 7.5



*Fig 7.4 A l'esquerra pols de vidre adherida a l'ànode per l'efecte d'electroforesi. A la dreta tortó format després de 15 min d'electrofiltració amb 0,45% NaCl i 30V.*



*Fig 7.5 A l'esquerra mostra de pols de vidre original. A la dreta tortó dissolt en aigua després de 15 min d'electrofiltració amb 0,45% NaCl i 30V.*

Per tant es compleix la teoria. Segons les equacions 2.2 i 2.3 de Hiemenz i Rajagopalan [17] el cabal electroosmòtic és directament proporcional al camp elèctric i la velocitat electroforètica també és directament proporcional al valor del camp elèctric. És a dir, quan més gran és el camp elèctric creat, més cabal de filtrat s'obté i més tortó serà desplaçat cap a l'ànode amb la consegüent reducció del gruix del tortó en la superfície del filtre i per tant disminució de la resistència específica del tortó, comportant un augment de la velocitat de filtració per l'efecte de la pressió.

### 7.1.2 Millores en el % de matèria sòlida obtingut en el tortó

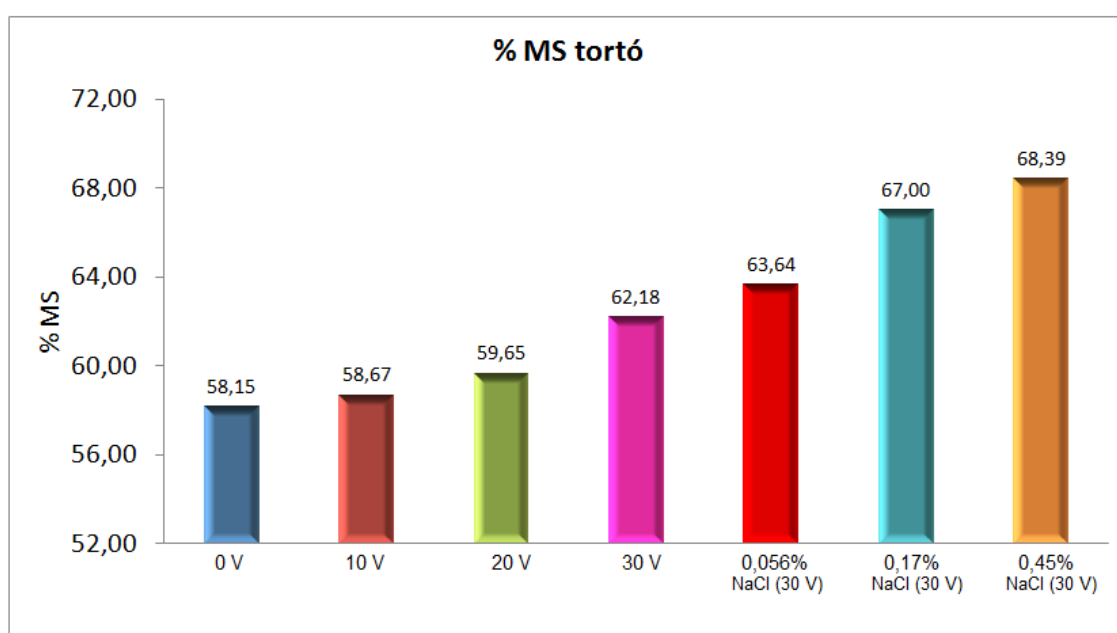


Fig 7.6 Evolució del volum de filtrat en l'electro-filtració.

Al disminuir el temps de filtració, s'observa també una disminució del contingut d'aigua del tortó format. Els valors obtinguts oscil·len entre el 58,15 % de matèria seca al aplicar 0 V i el 68,39% de matèria seca al aplicar 30 V en la mostra amb 0,45% de NaCl. Novament el % de MS del tortó augmenta al augmentar el voltatge i s'arriba a augmentar un 17,6% el contingut de matèria seca del tortó format comparant els casos de camp elèctric més i menys extrems.

Aquests resultats són coherents i a banda de l'aigua que l'electroosmosi pot arrossegar al augmentar el valor de la intensitat, el contingut d'aigua a mesura que disminueix el temps de filtració també es veu reduït, ja que com es fixa el mateix temps de filtració, l'efecte de la pressió sobre el tortó sense suspensió en la part superior provoca una major extracció d'aigua.

En aquesta experimentació només afecta l'electroosmosi, ja que com s'ha comentat en l'anterior apartat es va disminuir la separació dels elèctrodes per garantir un contacte constant entre l'ànode, el tortó i el càtode, fet que comporta que l'efecte de l'electroforesi quedi anul·lat. Novament es comprova l'equació de Hiemenz i Rajagopalan [17] que diu que el cabal electroosmòtic és proporcional a la intensitat del camp elèctric.



Fig 7.7 A l'esquerra tortó humit, a la dreta tortó sec després d'estar 24 h a 105°C.

### 7.1.3 Anàlisi de l'evolució de les propietats del filtrat

A continuació es mostren les gràfiques obtingudes de l'evolució del pH, conductivitat i temperatura. Cal destacar que després de realitzar nombroses experimentacions, es conclou que el valor de la terbolesa del filtrat no depèn de les condicions d'operació sinó de la distribució de les partícules a l'hora d'iniciar l'electrofiltració. Per aquesta raó es calcula la mitjana de les terbolesa del filtrat per construir la gràfica.

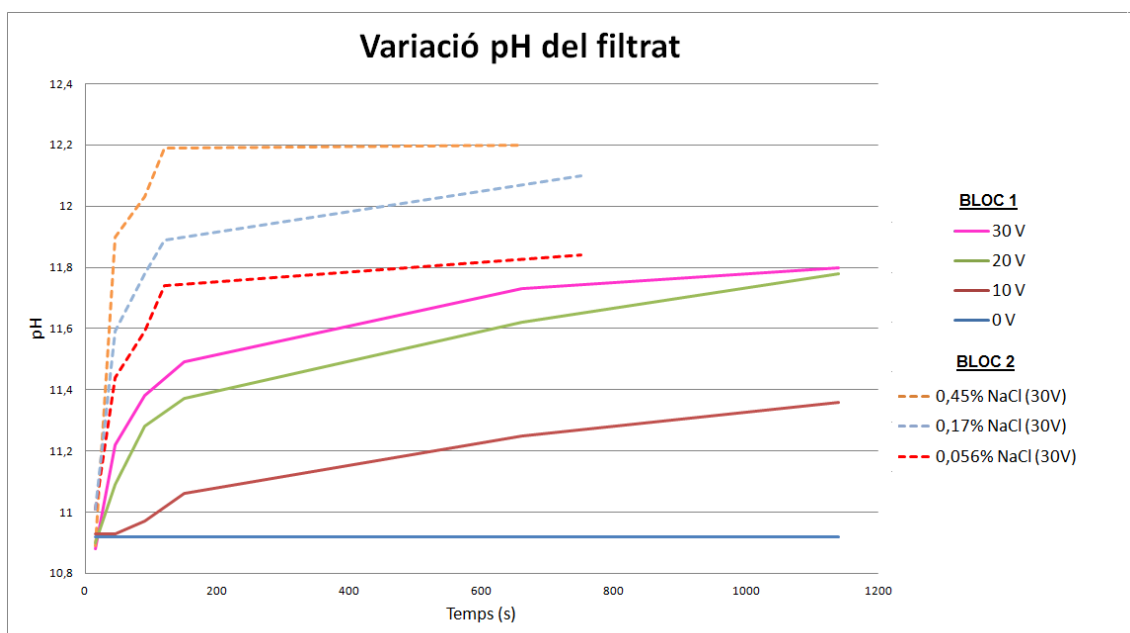
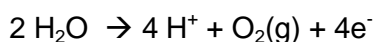


Fig 7.8 Gràfica variació del pH del filtrat amb el temps.

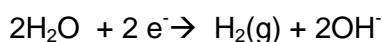
Segons la teoria comentada en l'apartat 2.1.3 en l'ànode, situat en la part superior del filtre, s'alliberen protons  $H^+$  degut a l'electròlisi de l'aigua, mentre que en el càtode s'alliberen hidròxids  $OH^-$ .

Reaccions en l'ànode:



L'ànode d'acer es veu oxidat, per tant la formació de protons  $H^+$  queda disminuïda per l'oxidació de l'ànode

Reaccions en el càtode:



Mentre que el càtode d'alumini no pateix cap tipus de reducció i per tant l'única reacció que es produeix és la de formació de  $OH^-$ .

Aquestes reaccions comporten que als voltants de l'ànode el pH serà àcid i al càtode bàsic. Es sospita que en el tortó queden retinguts amb l'aigua protons  $H^+$ , mentre que degut a que el càtode es troba situat a la part inferior i per sota del tortó, els  $OH^-$  produïts en aquest són arrossegats pel cabal de filtrat. Per la qual cosa i per entendre millor els resultats, un cop terminada la filtració es va dissoldre el tortó format en la mateixa quantitat d'aigua inicial i es va mesurar el pH. Els resultats obtinguts van ser els següents:

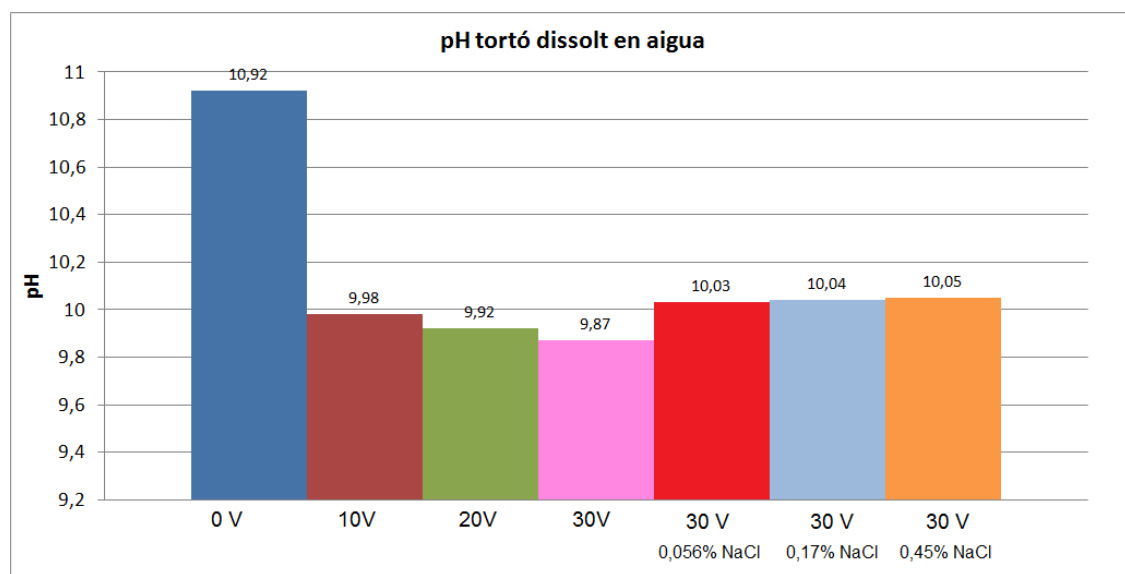


Fig 7.9 Variació del pH del tortó format dissolt en aigua

En aquesta gràfica s'observa que al no aplicar voltatge el pH roman constant com l'inicial (10.92) i a mesura que s'augmenta el voltatge, el valor del pH del tortó format disminueix per al Bloc 1. Per al Bloc 2 sembla que els resultats a priori no són coherents, ja que si es seguís la tendència del Bloc 1, el pH hauria de continuar disminuint. Però això no succeeix i tot i que es produeix una disminució del pH respecte al tortó format en la filtració a 0 V, tal i com s'espera per la presència de protons  $H^+$ , aquesta disminució és lleugerament superior als valors de pH del Bloc 1. Aquest fet pot ser explicat degut a que les filtracions en el Bloc 2 són més ràpides i el cabal de filtrat major. Conseqüentment els protons  $H^+$  són arrossegats amb més força pel filtrat i no queden tan retinguts en el tortó, per tant al obtenir un tortó amb menys protons  $H^+$  el valor del pH és superior. A més a més no cal obviar que com s'ha mostrat en les imatges, es produeix una oxidació de l'ànode, per tant la formació de protons  $H^+$  queda disminuïda per l'oxidació de l'acer.

Amb la Fig. 7.8 i la Fig. 7.9 es pot confirmar que en l'ànode es produeix  $H^+$  que disminueixen el pH de la mostra i una part d'ells queden retinguts en el tortó al trobar-se dissolts en l'aigua. Mentre que en el càtode es forma  $OH^-$  que augmenten el pH de la mostra i són arrossegats completament pel filtrat, provocant un augment del pH del filtrat obtingut a mesura que augmenta el temps. El fet que el pH del filtrat augmenti no només és degut a que part dels protons  $H^+$  com s'ha demostrat queden retinguts en el tortó sinó que també degut a l'oxidació de l'ànode, la producció de protons  $H^+$  és menor que la producció de  $OH^-$ , on el càtode no es redueix.

Així doncs, com es mostra en la Fig. 7.8 el valor del pH del filtrat augmenta amb el temps i amb el valor de la intensitat de camp elèctric i aquest valor varia entre 10,92 per al cas de 0V i 12,2 per al cas de 30V i 0,45% de NaCl.

A banda de la variació del pH per l'alliberació d'ions  $H^+$  i  $OH^-$ , no cal oblidar que en les reaccions electrolítiques es produeix oxigen en l'ànode i hidrogen en el càtode. Tot i que en aquest estudi no s'ha determinat de forma quantitativa si es produïa oxigen i hidrogen, si que es s'observa qualitativament que es produeix gas quan s'aplica corrent, que fent ús de la teoria, aquest gas ha de ser una barreja d'oxigen i hidrogen. Aquesta producció de gas només es visible per a les experimentacions del Bloc 2 quan es treballa amb una concentració de NaCl del 0,17% i del 0,45%, és a dir per intensitats superiors a 1 A.

Es va observar que el filtrat sortia gasificat i transcorregut uns segons aquest gas s'alliberava del filtrat i quedava el filtrat transparent. Aquest fet es pot observar en la Fig. 7.10



Fig 7.10 Filtrat gasificat. En la part inferior del vas de precipitats s'observa com es va desgasificant.

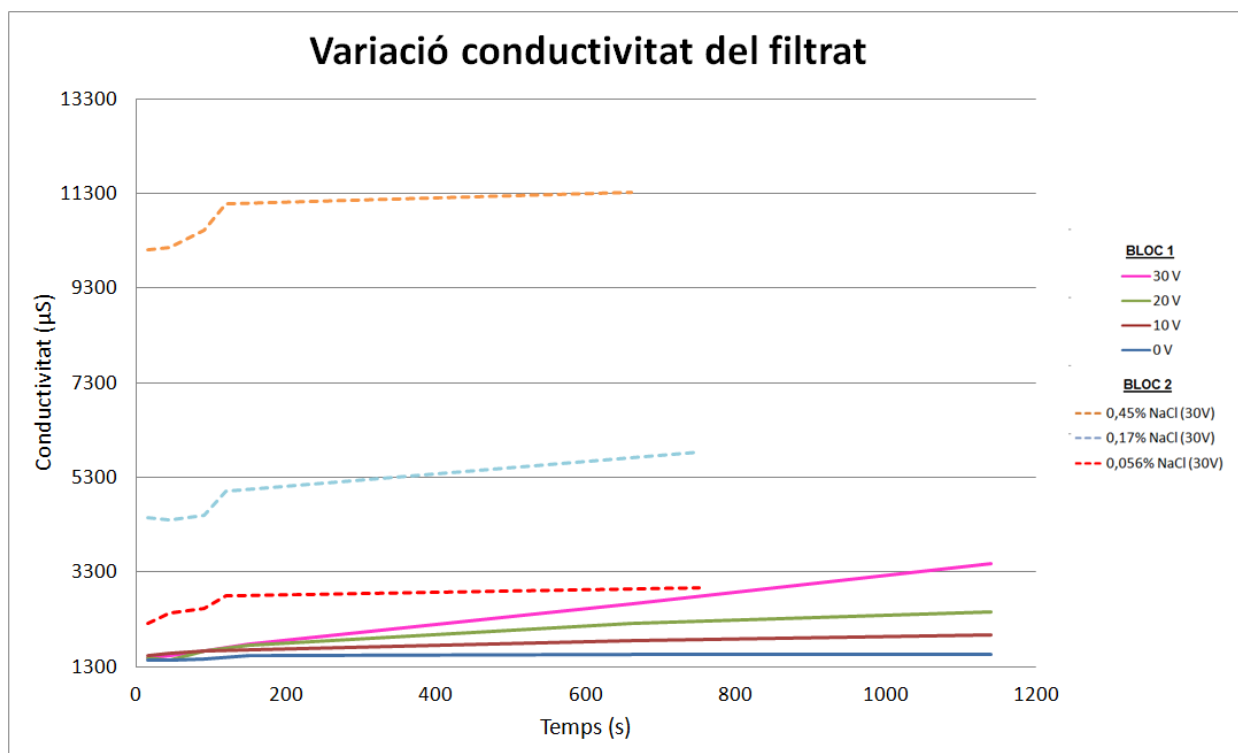


Fig 7.11 Gràfic variació de la conductivitat del filtrat amb el temps.

En aquest cas cal diferenciar la variació de la conductivitat entre els dos blocs, ja que l'augment de la conductivitat per les experimentacions en el Bloc 2 bàsicament és degut a l'addició de la sal NaCl expressament per augmentar la conductivitat i d'aquesta manera augmentar la intensitat de camp elèctric i observar majors efectes de l'electroforesi i electroosmosi.

Així doncs, les experimentacions en el Bloc 1 permeten concloure que a mesura que augmenta el voltatge aplicat i el temps de filtració, augmenta la conductivitat de la mostra. Aquest fet s'explica degut a que a mesura que augmenta la intensitat de camp elèctric, les reaccions electrolítiques augmenten i per tant augmentarà la producció d'ions  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  i altres ions metàl·lics deguts a les reacció d'oxidació de l'ànode.

Per al Bloc 2, tot i que no es poden comparar els valors els uns amb els altres, també s'observa un increment de la conductivitat del filtrat a mesura que augmenta el temps.

El cas del Bloc 1, treballant amb un voltatge de 30 V, és en el que s'observa un augment més acusat de la conductivitat, concretament del 235%. Mentre que els altres casos l'augment oscil·la entre el 166% i el 111%, degut a que en les experimentacions del Bloc 1 de 10 i 20 V, la intensitat no és suficientment elevada com per produir una gran quantitat d'ions  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  per tant la conductivitat no varia gaire.

En canvi per els casos del Bloc 2, on es treballa amb intensitats elevades aquest augment de la conductivitat hauria de ser més pronunciat. Però no és així ja que en aquestes mostres s'ha afegit NaCl, per tant la quantitat de  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}^+$  produïda queda minvada per la presència de NaCl que és el que realment augmenta la conductivitat de la mostra.



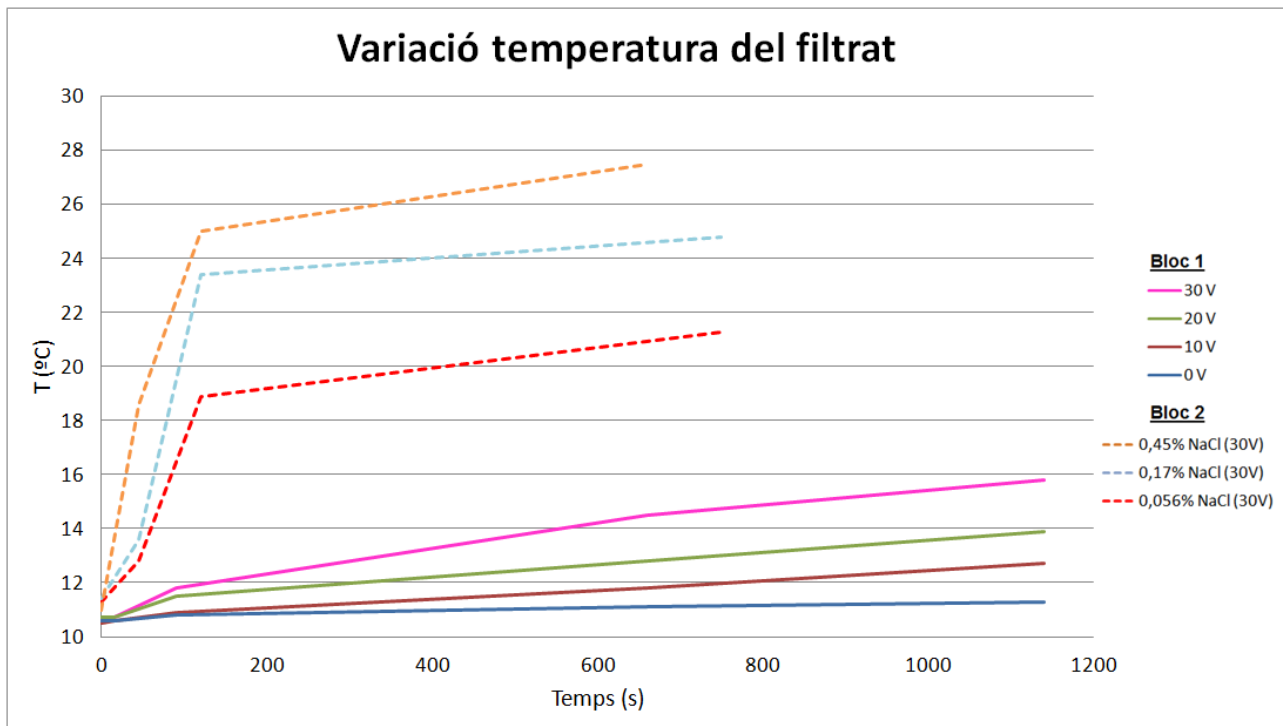


Fig 7.12 Gràfica variació de la temperatura del filtrat amb el temps.

Un altre efecte que provoca l'electro-filtració és l'augment de temperatura per l'efecte Joule, degut al calor produït quan l'electricitat circula per una resistència. En aquest cas la resistència és la suspensió de pols de vidre.

El calor generat es calcula a partir de la fórmula

$$Q = 0,24 \cdot R \cdot I^2 \cdot t \quad (\text{Eq. 7.1})$$

En les experimentacions s'observa que la intensitat per a cada cas roman constant. La producció d'oxigen i hidrogen, per efecte de l'electròlisi, augmenta la resistència de la suspensió. Per tant al augmentar la resistència i el temps, efectivament tal i com indica l'equació 7.1, es produeix un augment de la temperatura tal i com es mostra en la gràfica. L'augment de la temperatura varia de 10,5 °C (temperatura de l'aigua a l'hora de realitzar les experimentacions) fins a 27,5 °C després de filtrar 15 min la mostra amb 0,45% de NaCl i aplicant 30 V. Per tant aquest efecte, tot i que redueix la viscositat de la mostra i contribueix a que la filtració sigui més ràpida, no és del tot positiu, ja que la temperatura és considerada com un contaminant i si el filtrat es rebutja, s'haurà de disminuir la temperatura d'aquest.

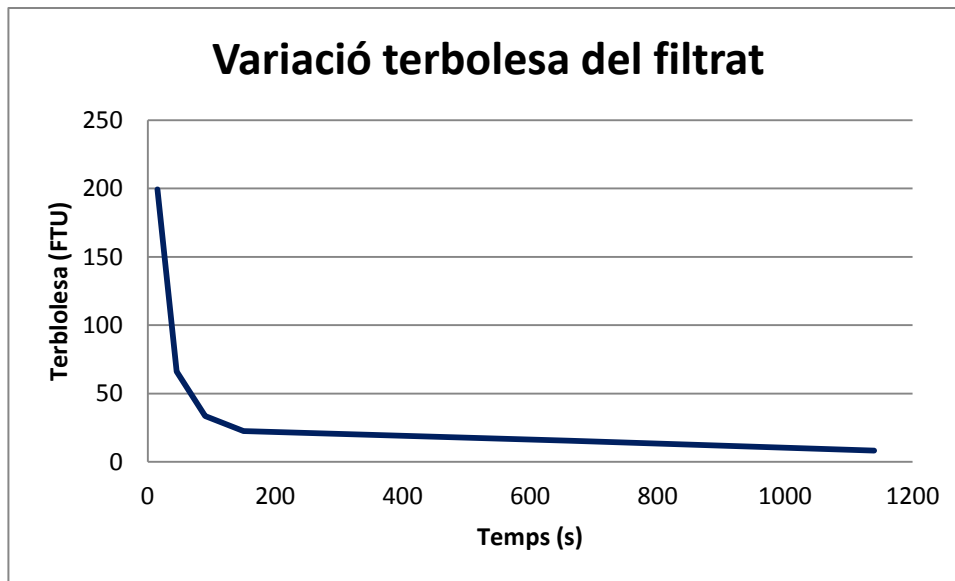


Fig 7.13 Gràfic variació de la terbolesa de les mostres amb el temps

Tal i com s'ha comentat en la introducció, la variació de la terbolesa del filtrat només depèn de com es distribueix la pols de vidre a l'hora de formar la capa. Aquesta distribució depèn de l'homogeneïtzació del dipòsit i de les variacions produïdes a l'hora d'obrir la vàlvula per iniciar la filtració.

Tot i així, s'observa que als primers 30 segons, la qualitat del filtrat és força dolenta, arribant als 200 FTU de mitja, degut a que no dóna temps a formar la capa en la tela de filtre i les partícules més fines no queden retingudes en el filtre. A mesura que augmenta el gruix del tortó amb el temps, la qualitat del filtrat augmenta fins a ser visiblement transparent amb una terbolesa mitja de 8,15 FTU als 20 minuts.

Les següents imatges mostren la qualitat del filtrat en cada interval de temps.

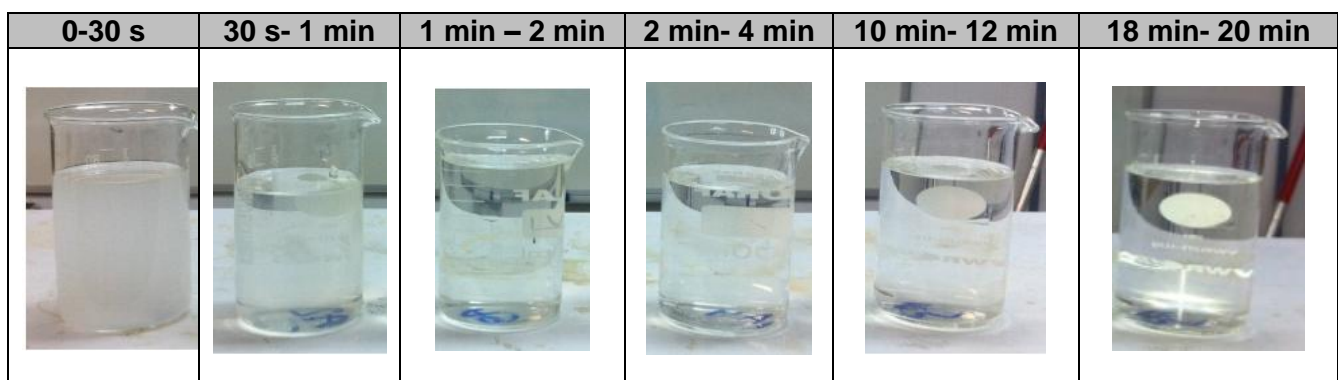


Fig 7.14 Aspecte visual de les mostres de filtrat obtingudes. Condicions: 45% NaCl i 30 V

## **7.2 Determinació de la pressió electroosmòtica i la resistència específica del tortó a partir de les experimentacions realitzades amb la suspensió de pols de vidre.**

Per tal de comprovar matemàticament els efectes de l'electroforesi i l'electroosmosi, es realitza el càlcul de la variació de la resistència específica del tortó i el càlcul de la variació de la pressió electroosmòtica respectivament.

Amb el càlcul de la pressió electroosmòtica [10] es pretén demostrar mitjançant el model matemàtic desenvolupat per Yukawa, que aquesta augmenta amb l'augment del camp elèctric.

En canvi, amb el càlcul de la resistència específica del tortó [37,8] es pretén analitzar com varia la resistència d'aquest al augmentar la intensitat del camp elèctric comportant un menor efecte de l'electroforèsi i una disminució de la formació de capa de tortó en el càtode.

### *7.2.1 Càlcul de la pressió electroosmòtica:*

A partir de l'equació 7.2 i mitjançant els valors de  $Q_{eo}$  i  $Q_p$  calculats a partir de les dades experimentals, es pot determinar el valor de la pressió electroosmòtica per a cada condició de filtració, tal i com mostra la taula 7.1.

$$\Delta P_E = \Delta P_H \times \frac{Q_{eo}}{Q_p} \quad (\text{Eq. 7.2})$$

<b>Cas</b>	<b><math>\Delta P_E</math> (bar)</b>
0 V 0% NaCl	0
10 V 0% NaCl	0,0034
20 V 0% NaCl	0,0268
30 V 0% NaCl	0,0451
30 V 0,056% NaCl	0,15
30 V 0,17% NaCl	0,18
30 V 0,45% NaCl	0,30

*Taula 7.1 Pressió electroosmòtica per a cada cas.*

Per tant, com s'observa en la taula 7.1, el valor de la pressió electroosmòtica augmenta proporcionalment amb l'augment de la intensitat del camp elèctric i arriba a obtenir un valor de 0,3 bars quan s'aconsegueix la major intensitat de camp elèctric. Aquest fet és degut a que l'augment del camp elèctric provoca un augment de l'efecte de l'electroosmosi i per tant un major cabal electroosmòtic.

### 7.2.2 Càlcul de la resistència específica del tortó:

La resistència que s'oposa a la filtració és deguda a [37]:

- Viscositat del líquid
- Torta de filtració
- Medi filtrant.

Llavors es pot escriure,

$$R = \mu \cdot r_c (L_c + L_m) \quad (\text{Eq. 7.3})$$

La resistència específica del tortó  $r_c$  és definida com la resistència oposada al pas del filtrat a través del tortó de filtració. Les unitats amb les que s'expressa són  $m^{-2}$

Al combinar  $L_m$  (gruix fictíci del medi filtrant) amb  $L_c$  (gruix del tortó),  $L_m$ , que és habitualment conegut com la longitud equivalent de tortó, s'equipara com la resistència que el medi filtrant oposa al pas del filtrat, com si correspongués a una determinada longitud de tortó. La longitud del tortó  $L_c$  varia constantment amb el volum de filtrat i tenint en compte la densitat del  $\rho_s$  sòlid i el pes de sòlids presents per unitat de volum  $w_s$ , es pot escriure com:

$$L_c = \frac{w_s V}{\rho_s} \frac{1}{A} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

Combinant les equacions 7.3 i 7.4, queda:

$$R = \mu \cdot r_c \left( \frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m \right) \quad (\text{Eq. 7.5})$$

La velocitat de filtració és mesurada amb  $dV/dt$ .

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A(\Delta P)}{\mu \cdot r_c \left( \frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m \right)} \quad (\text{Eq. 7.6})$$

L'equació 7.6 és considerada com l'equació bàsica de filtració i aplicant-li el tractament matemàtic adequat permetrà calcular la resistència específica del tortó expressada en  $m^{-2}$

L'equació 7.6 porta a dues possibles condicions de treball, discutides a continuació:

*Velocitat constant de filtració:* En la primera etapa de filtració, generalment la formació de tortó és quasi nul·la i per tant, la resistència a la filtració és menor; amb la conseqüència que la velocitat de filtració és pràcticament constant.

$$\frac{V/A}{t} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot r_c \left( \frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m \right)} \quad (\text{Eq. 7.7})$$

Però un cop comença a formar-se tortó, la velocitat de filtració variarà i no serà constant. Per tal de mantenir la velocitat de filtració constant, es necessita ajustar el valor de  $\Delta P$  incrementant la pressió, cosa que és difícil. Generalment no es treballa seguint una velocitat constant, es prefereix treballar mantenint la pressió constant.

*Filtració a pressió constant:* En aquest cas es manté la pressió constant. La velocitat de filtració anirà variant. Al ser la pressió constant, l'equació 7.6 queda:

$$A(\Delta P)dt = \mu \cdot r_c \left( \frac{w_s V}{\rho_s A} + L_m \right) dV \quad (\text{Eq. 7.8})$$

Integrant l'expressió:

$$A(\Delta P)t = \mu \cdot r_c \left( \frac{w_s}{2\rho_s} \frac{V^2}{A} + L_m V \right) = \mu \cdot r_c \left( \frac{w_s}{2\rho_s} \frac{V}{A} + L_m \right) V \quad (\text{Eq. 7.9})$$

$$At = \frac{\mu \cdot r_c \cdot w_s}{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_s} \left( \frac{V}{A} \right) + \frac{\mu \cdot r_c \cdot L_m}{\Delta P} \quad (\text{Eq. 7.10})$$

$$\frac{t}{V/A} = \frac{\mu \cdot r_c \cdot w_s}{\Delta P \cdot 2 \cdot \rho_s} \left( \frac{V}{A} \right) + \frac{\mu \cdot r_c}{\Delta P} L_m \quad (\text{Eq. 7.11})$$

L'equació 7.11 representa una recta amb  $V/A$  com variable independent i  $t/(V/A)$  com a variable dependent. Si es representa en una gràfica  $V/A$  enfront de  $t/(V/A)$  on  $V$  és el volum de filtrat i  $t$  el temps, s'obté un pendent i una ordenada a l'origen;

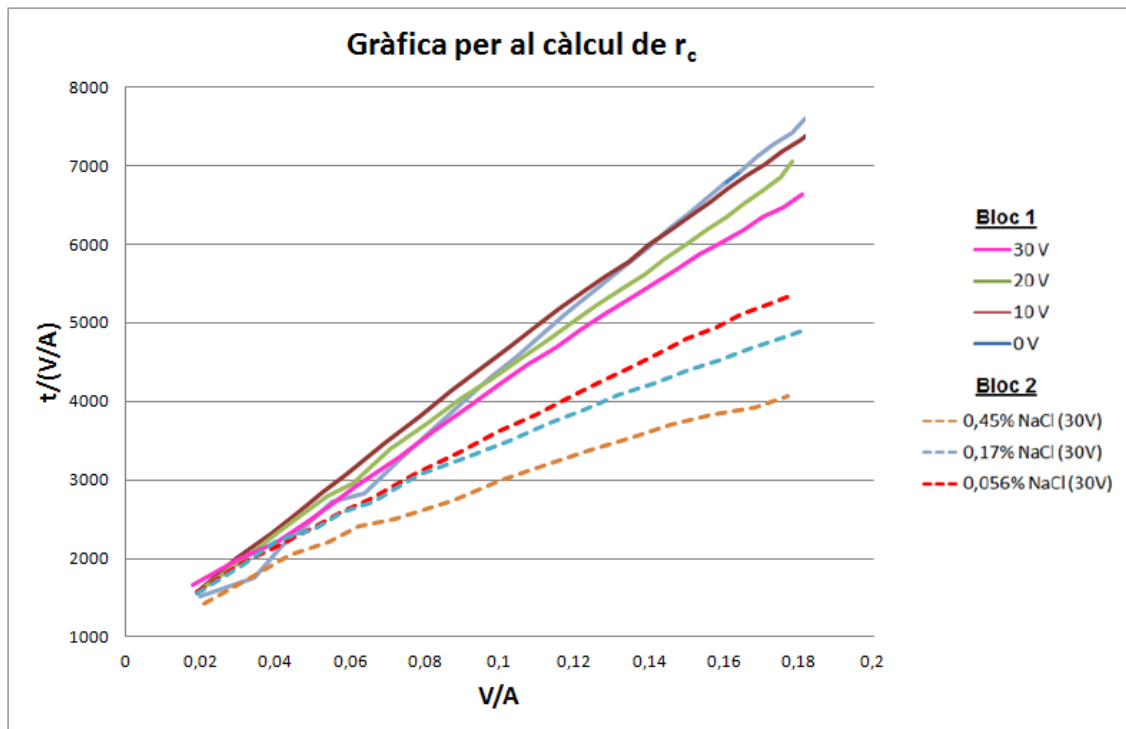
$$\text{Pendent} = \frac{\mu \cdot r_c \cdot w_s}{\Delta P \cdot 2 \cdot \rho_s} \quad (\text{Eq. 7.12})$$

$$\text{Ordenada a l'origen} = \frac{\mu \cdot r_c}{\Delta P} L_m \quad (\text{Eq. 7.13})$$

Per tenir en compte l'efecte de l'electroosmosi, el valor de  $\Delta P$  es calcula sumant la pressió hidràulica aplicada i la pressió electroosmòtica calculada anteriorment.

Per tant com que la viscositat de l'aigua  $\mu$  és coneguda,  $\Delta P$  també,  $w_s$  (kg de sòlid presents en un  $m^3$  de suspensió) també i la densitat del sòlid  $\rho_s$  pot ser mesurada, mitjanant el pendent s'obté el valor de la resistència específica del tortó.

A partir dels valors obtinguts per l'experimentació amb pols de vidre al 7%, es construeix la següent gràfica, per al calcul de  $r_c$ :

Fig 7.15 Gràfica amb regressió lineal per el càlcul de  $r_c$ 








Les rectes regressió per a cada cas valen:

Cas	Recta regressió	Coefficient electroforètic
0 V 0% NaCl	$y = 38926x + 515,66$	$R^2 = 0,9986$
10 V 0% NaCl	$y = 35833x + 964,97$	$R^2 = 0,9995$
20 V 0% NaCl	$y = 33719x + 962,47$	$R^2 = 0,9996$
30 V 0% NaCl	$y = 31408x + 1027,3$	$R^2 = 0,9989$
30 V 0,056% NaCl	$y = 23757x + 1202,7$	$R^2 = 0,999$
30 V 0,17% NaCl	$y = 20055x + 1376,4$	$R^2 = 0,9942$
30 V 0,45% NaCl	$y = 16266x + 1294,9$	$R^2 = 0,9889$

Taula 7.2 Rectes de regressió obtingudes.

Es pren un valor de viscositat de l'aigua a 10 °C de  $1307 \times 10^{-6}$  Pa·s i una densitat de la partícula sòlida de  $1998 \text{ Kg/m}^3$ .

La taula 7.3 mostra els resultats obtinguts a partir de l'equació 7.12.

Cas	$r_c$ (m <sup>-2</sup> )
0 V 0% NaCl 	6,28 x 10 <sup>14</sup>
10 V 0% NaCl 	5,83 x 10 <sup>14</sup>
20 V 0% NaCl 	5,80 x 10 <sup>14</sup>
30 V 0% NaCl 	5,63 x 10 <sup>14</sup>
30 V 0,056% NaCl 	5,27 x 10 <sup>14</sup>
30 V 0,17% NaCl 	4,69 x 10 <sup>14</sup>
30 V 0,45% NaCl 	4,59 x 10 <sup>14</sup>

Taula 7.3 Resistències específiques del tortó obtingudes.

Així doncs tal hi com es mostra en la taula 7.3, el valor de la resistència específica del tortó format, disminueix a mesura que augmenta la intensitat del camp elèctric. Aquest fet, s'explica ja que quan més elevat és el camp elèctric creat, més efecte de l'electroforesi es produirà tal i com s'ha comprovat en les experimentacions. Per tant, el tortó format tindrà un gruix menor degut a la formació d'una capa de partícules en l'ànode per el moviment electroforètic i conseqüentment la resistència específica del tortó disminuirà.

La resistència específica del tortó ( $r_c$ ) s'arriba a reduir un 73 %, passant d'un valor de 6,28 x 10<sup>14</sup> per la filtració a pressió convencional a un valor de 4,59 x 10<sup>14</sup> quan s'aconsegueix la major intensitat de camp elèctric.

### **7.3 Efecte del camp elèctric sobre suspensions de puré de patata, concentrat de verdures i ciment.**

Després d'observar que es produïa una variació de les característiques de la mostra, es va experimentar amb aquestes tres substàncies per determinar si l'electrofiltració és una tècnica que pot ser aplicada per filtrar substàncies on el que interessa és el sòlid filtrat, que no pot ser alterat, o si degut a que es modifiquen les característiques de la mostra, només és una tècnica aplicable per processos on només interessa extreure la major quantitat d'aigua del tortó format i no importa que es modifiquin les característiques de la mostra.

Les intensitats de treball varien segons la conductivitat de la mostra. En la taula 7.4 es mostren les intensitats mitges amb les que es va operar.



Mostra	Puré patata	Concentrat verdura	Ciment
Voltatge (V)	30	16	30
Intensitat mitja (A)	0,35	3,5	1,53

Taula 7.4 Intensitats de treball.

El valor del voltatge amb el que es va treballar amb la suspensió de concentrat de verdures és de 16 V, ja que degut a l'elevada conductivitat de la mostra i que la intensitat màxima de treball de la font d'alimentació que és de 5 A, la font d'alimentació està programada per disminuir automàticament el voltatge per tal de no superar aquest límit d'amperatge.

Un cop produïda l'electro-filtració i després d'analitzar el pH abans i després d'aplicar el camp elèctric, els resultats obtinguts són els següents:

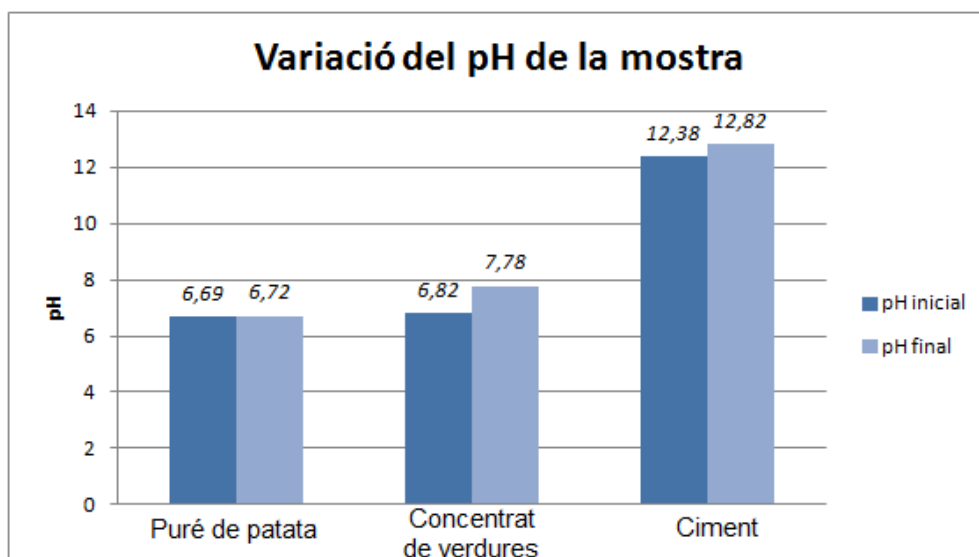
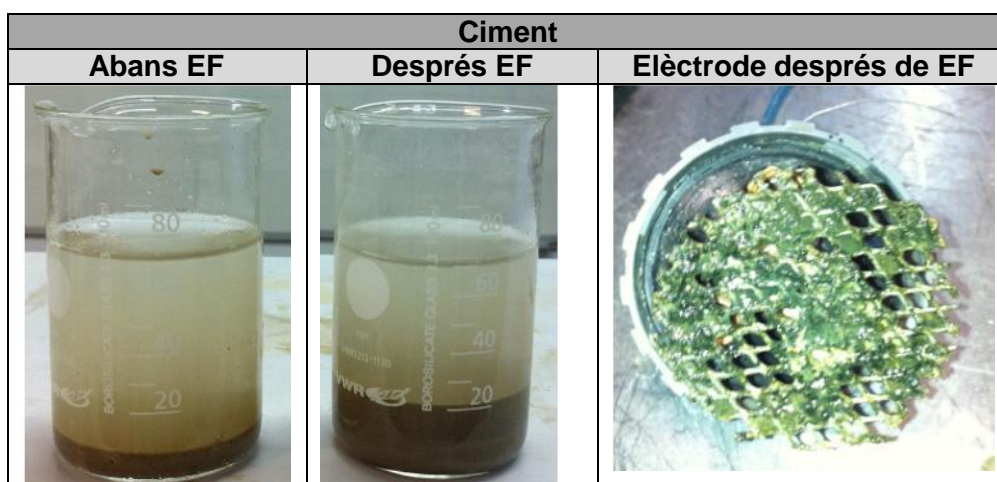
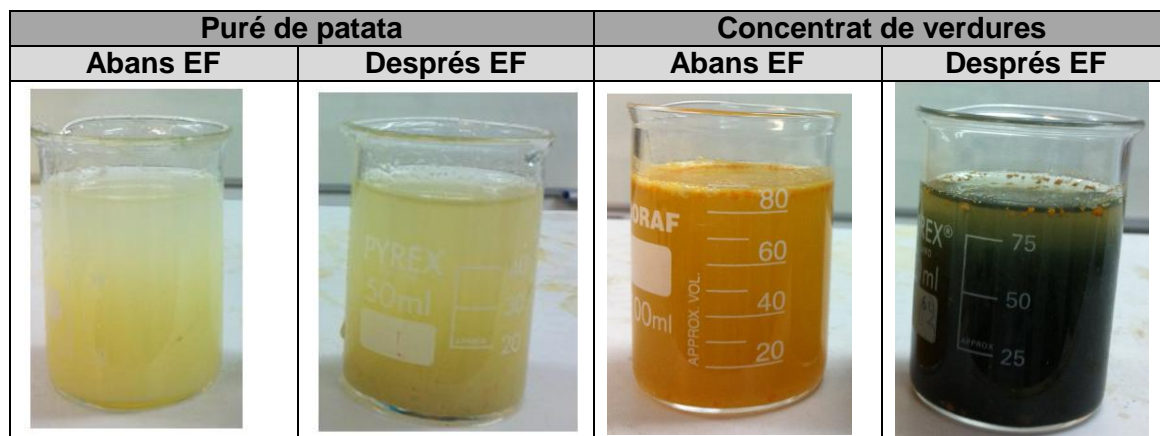


Fig 7.16 Gràfic representant la variació del pH de la mostra

Per tant s'observa que per a cada mostra es produeix un augment del pH, degut a la producció de  $\text{OH}^-$  en el càtode que augmenten el pH i donen basicitat a la mostra.

Les següents imatges mostren com a simple vista s'observa una alteració de l'aparença de la mostra. Per al ciment, com que aquesta variació costa més de detectar degut al color fosc de la substància, s'adjunta la foto de l'elèctrode amb el ciment adherit i oxidat a l'ànode.



*Fig 7.17 Variació de les característiques de la mostra. Visualment s'observa que la mostra queda alterada.*

Per tant aquests resultats permeten concloure que l'electro-filtració només pot ser emprada per aquells tipus de processos on la substància filtrada sigui un rebuig, com per exemple fangs de depuradora, o aquells processos on no importi que s'alterin les característiques del sòlid obtingut. Així doncs, no és aplicable en altres tipus d'indústries com per exemple la farmacèutica, alimentària o química.

Per acabar de confirmar que no és una tècnica viable per aquest tipus d'indústries, s'haurien de realitzar altres tipus de proves amb diferents elèctrodes que no es descomponguessin, com per exemple el titani, rodi o polímers conjugats.

## CAPITOL 8: ESTUDI ECONÒMIC

### 8.1 Introducció:

Com s'ha demostrat anteriorment, l'electro-filtració és una bona tècnica per extreure aigua de suspensions que no interessa el tortó de residu obtingut, ja que l'efecte del camp elèctric modifica les propietats d'aquest. Tal i com s'ha observat en l'estudi, es redueixen els temps de filtració i es redueix el contingut d'aigua del residu. Per tant sembla ser una tècnica que podria substituir a les filtracions a pressió actuals en aquell tipus de processos que es vol extreure l'aigua d'una suspensió sòlid-líquid on el líquid és un rebuig, si els resultats econòmics acompanyen i provoca una disminució dels costos d'operació.

Així doncs en aquest apartat es realitzarà l'estudi econòmic a partir del funcionament simulat d'un sistema d'electro-filtració que separa la pols de vidre generada en una cristalleria, d'una suspensió d'aigua. En aquest cas la pols de vidre és un residu que ha de ser portat a l'abocador i que interessa obtenir el més sec possible, degut a que quan menys volum i més sec, menys costos representarà per l'empresa el fet de desprendre's d'aquest rebuig generat. L'empresa, de caire familiar, treballa 240 dies a l'any 8 hores al dia i actualment ja disposa d'un filtre a pressió que té completament amortitzat per filtrar la pols de vidre. Per tant en l'estudi s'avaluarà si la inversió que s'ha de fer per obtenir un electro-filtre és rentable.

Per tal d'avaluar la viabilitat econòmica de la nova tècnica, l'inversió addicional i els costos d'operació han de ser compensats per la generació de fluxos de caixa. Es calcularà el cost d'instal·lació de l'equip d'electro-filtre a pressió. Es calcularà també si l'electro-filtració provoca un estalvi econòmic sobre la filtració a pressió convencional i en cas de que sigui així, es determinarà quin és el pay-back de la inversió.

Degut a possibles variacions en els preus de mercat del kWh d'electricitat, les matèries primes (acer, alumini i NaCl), els serveis de transport i cànon a pagar a l'abocador, l'estudi es divideix en dos escenaris: un optimista i l'altre pessimista. L'optimista com indica el seu nom tendirà a prendre uns valors més positius per l'estudi econòmic i el pessimista més negatius.

Amb la intenció d'apropar-se a la realitat, es simula que es treballa en una cristalleria on es produeix una quantitat de pols diària de 30 Kg que és recollida mitjançant aigua corrent en recirculació i al final del dia s'obté un volum de suspensió a

filtrar de 400 litres al 7 % en pols de vidre. Es marca una pressió de treball de 7 bars i un temps de filtració per al cas A de 90 minuts.

Les dades dels temps de filtració i % MS del tortó, són les que marcaran les diferències entre una tècnica i l'altra. Es fa ús de les dades experimentals en l'apartat 6.3.2, que resumidament són les que es mostren en la taula 8.1:

TÈCNICA	CAS	Voltatge (V)	% NaCl	Intensitat (A)	Temps filtració 1 L (s)	% MS tortó
<b>Filtració a pressió</b>	<b>A</b>	0	0	0	1325	58,15
<b>Electro-filtració a pressió</b>	<b>B</b>	10	0	0,1	1268	58,67
	<b>C</b>	20	0	0,2	1208	59,65
	<b>D</b>	30	0	0,35	1133	62,18
	<b>E</b>	30	0,056	0,6	935	63,64
	<b>F</b>	30	0,17	1,05	849	67
	<b>G</b>	30	0,45	2,25	697	68,39

Taula 8.1 Resum condicions experimentació i resultats obtinguts.

Tot i que es varia la pressió de treball, el volum de mostra a tractar i la mida de l'equip, com que la concentració de pols es manté al mateix valor que es va fixar en les experimentacions, es suposa que les relacions entre els temps de filtració i el % de MS entre els experiments variant el valor del camp elèctric es mantenen constants.

## 8.2 Factors econòmics:

### 8.2.1 Costos d'instal·lació, pressupost i planificació:

Per implementar la tècnica d'electro-filtració en un sistema de filtració a pressió convencional, tres són els factors que s'han de tenir en compte: la font alimentació, els elèctrodes i el cablejat elèctric. En el cost de la instal·lació no s'inclou els elèctrodes, ja que aquests han de ser substituïts periòdicament i es veuen reflectits en els costos d'operació, ni el cablejat elèctric, ja que es dedueix en el pressupost.

A continuació es detalla el cost d'instal·lació addicionals que s'estima necessaris i a partir dels quals es calcularà el pressupost i l'estudi econòmic.

Concepte	Detall	Cost (€)
Font alimentació Greico VD-305. Tensió regulable	30 V – 5 A	409
<b>TOTAL</b>		<b>409</b>

Taula 8.2 Cost addicional per a la instal·lació de l'electro-filtre.

Per calcular l'amortització anual de la inversió s'estima una vida útil de 20 anys i un valor residual de 150 € per a l'escenari optimista i una vida útil de 15 anys i un valor residual de 70 € per l'escenari pessimista.

El pressupost d'instal·lació de l'electro-filtre és el següent:

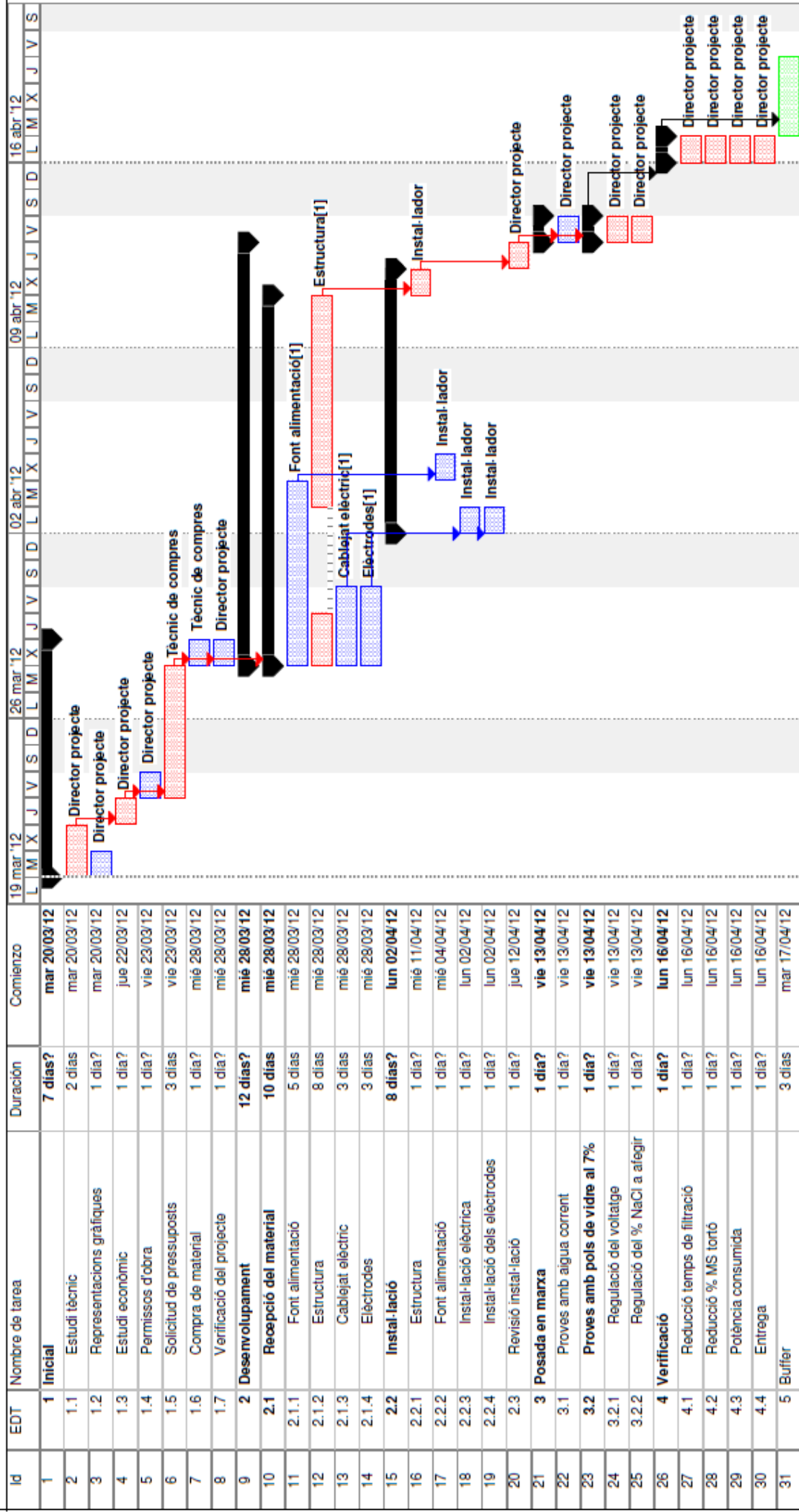
<b>Equips (E)</b>	409	
<b>Materials (M) (60% E)</b>	<b>Obra civil (45% M)</b>	110,43
	<b>Electricitat (25% M)</b>	61,35
	<b>Aïllament (20% M)</b>	49,08
	<b>Pintura (10% M)</b>	24,54
	<b>TOTAL</b>	245,4
<b>Enginyeria de detall (10 % E+M)</b>	65,44	
<b>Construcció (15 % E+M)</b>	98,16	
<b>Supervisió construcció (10 % E+M)</b>	65,44	
<b>TOTAL 1 (T1)</b>	883,44	
<b>Serveis auxiliars (4% T1)</b>	35,33	
<b>Interconnexions (3% T1)</b>	26,50	
<b>Posada en marxa (3% T1)</b>	26,50	
<b>TOTAL 2 (T2)</b>	88,35	
<b>Imprevistos (3% T2)</b>	4,41	
<b>TOTAL (€)</b>	976,20	

Taula 8.3 Pressupost estimat de l'instal·lació de l'electro-filtre.

Per tant la implementació de l'electro-filtre en un sistema de filtració a pressió convencional s'estima en 976,20 €.

En la següent pàgina es mostra el Diagrama de Gantt de la planificació de l'adaptació del sistema d'electro-filtració a el filtre a pressió que disposa l'empresa, realitzat mitjançant el programa Microsoft Project.

# Instal·lació electro-filtre a pressió



■ Tarea  
■ Tarea crítica  
■ Progreso  
◆ Hitlo

■ Resumen  
■ Tarea resumida  
■ Tarea crítica resumida  
◆ Hitlo resumido

■ Progreso resumido  
■ División  
■ Tareas externas  
■ Resumen del proyecto

■ Agrupar por síntesis  
→ Fecha límite

David Martínez Capilla  
 Enginyer Industrial Químic

Proyecto: Planificación instal·lació  
 Fecha: mar 20/03/12

### 8.2.2 Costos d'operació

A banda dels costos d'instal·lació, l'equip té uns costos de manteniment, de funcionament i d'eliminació del residu que es detallen a continuació:

- *Cost manteniment*

El manteniment fix per possibles avaries del sistema s'estima a 100 € a l'any. Per l'electro-filtració, a més a més s'hi ha de sumar el canvi dels elèctrodes. La durada de l'ànode d'acer es determina per a cada cas, ja que quan més intensitat de camp elèctric es produeixi, abans es descompondrà. La taula 8.4 mostra les durades fixades:

<b>DURADA DE L'ÀNODE ABANS DE LA DESCOMPOSICIÓ</b>						
<b>CAS</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<b>Optimista (dies)</b>	25	22	20	18	15	10
<b>Pessimista (dies)</b>	20	17	15	13	10	5

Taula 8.4 Durada establerta per l'ànode

El preu de la reixeta d'acer es fixa a 25 €/m<sup>2</sup> per l'escenari optimista i a 40 €/m<sup>2</sup> per l'escenari pessimista.

Tot i que en la pràctica no s'ha observat la descomposició del càtode, per prevenció es substituirà un cop a l'any independentment de les condicions de treball. El preu de l'alumini es de 65 €/m<sup>2</sup> per l'escenari optimista i 120 €/m<sup>2</sup> per l'escenari pessimista.

- *Cost de funcionament*

Els costos de funcionament estan governats per l'electricitat consumida i la quantitat de sal afegida (si s'escau) per tal d'augmentar la conductivitat i incrementar el valor del camp elèctric i el cost de la mà d'obra necessària.

L'electricitat consumida ve marcada per la potencia consumida i el temps de funcionament de la font d'alimentació, l'agitador i l'aire comprimit, que en tots els casos es coneguda per les especificacions tècniques facilitades pel distribuïdor.

El preu del kWh es fixa a 0,13 € per l'escenari optimista i a 0,15 per l'escenari pessimista. Respecte el consum de sal, el preu es fixa a 0,12 €/kg per l'escenari optimista i a 0,18 per l'escenari pessimista.

El cost de producció de l'aire comprimit s'estima a 0,05 €/m<sup>3</sup> per l'escenari optimista i 0.02 €/m<sup>3</sup> per l'escenari pessimista.

Es determina que es necessita una hora d'operari al dia per realitzar les tasques de funcionament i neteja del filtre al dia. El preu/hora de l'operari s'estima a 15 €/hora. La funció de l'operari és la de fer funcionar el sistema, retirar el tortó un cop terminada la filtració, netejar el filtre i substituir periòdicament l'ànode, el càtode i la tela filtrant.

- *Cost d'eliminació del residu*

Una de les millores de l'electro-filtració, és la reducció del contingut d'aigua del tortó format. Per tant, al reduir el pes de tortó format es reduiran els costos d'eliminació del residu.

Un cop generat el residu, aquest es va acumulant en uns containers d'emmagatzematge que periòdicament s'han de buidar. Els costos d'eliminació de residu es divideixen en dos, per una banda el cost del transport del residu a l'abocador i per l'altra el cànon a pagar a l'abocador per la deposició i tractament del residu.

El cost de transport variarà en funció de les taxes imposades pel gestor de residus i la distància a recórrer. Per l'escenari optimista el cost del transport s'estima al 0,013 €/Kg i per l'escenari pessimista a 0,008 €/Kg

El residu és catalogat com un residu inert de la categoria T11. Els cànon establerts a pagar varien lleugerament entre diferents abocadors. Es pren un valor de 0,026 €/kg per tal de ser dipositat en l'abocador per l'escenari optimista i de 0,022 €/kg per l'escenari pessimista.

### **8.3 Pay-back de la instal·lació**

Un cop definits i calculats tots els costos anuals , a continuació es mostren els resultats obtinguts i el càlcul del pay-back per a cada cas i cada escenari:



ESCENARI OPTIMISTA					
	Cost manteniment (€)	Cost funcionament (€)	Cost eliminació residu (€)	Cost amortització (€)	TOTAL
<b>A</b>	100,00	3602,06	450,70	0,00	4152,76
<b>B</b>	109,29	3608,71	445,06	41,31	4204,37
<b>C</b>	109,69	3608,32	434,52	41,31	4193,83
<b>D</b>	110,64	3607,83	407,29	41,31	4167,07
<b>E</b>	111,83	3612,98	391,57	41,31	4157,69
<b>F</b>	114,38	3625,56	355,37	41,31	4136,62
<b>G</b>	116,92	3656,82	340,41	41,31	4155,46

Flux caixa (€)	Pay-Back (anys)
-51,61	-18,91
-41,07	-23,77
-14,31	-68,23
-4,93	-197,86
16,14	60,48
-2,70	-361,16

ESCENARI PESSIMISTA					
	Cost manteniment (€)	Cost funcionament (€)	Cost eliminació residu (€)	Cost amortització (€)	TOTAL
<b>A</b>	100,00	3602,06	346,69	0,00	4048,75
<b>B</b>	115,27	3609,73	342,36	60,41	4127,77
<b>C</b>	117,42	3609,28	334,24	60,41	4121,36
<b>D</b>	119,34	3608,71	313,30	60,41	4101,77
<b>E</b>	121,85	3616,90	301,20	60,41	4100,36
<b>F</b>	127,48	3635,95	273,36	60,41	4097,21
<b>G</b>	151,91	3683,18	261,85	60,41	4157,36

Flux caixa (€)	Pay-Back (anys)
-79,02	-12,35
-72,61	-13,44
-53,02	-18,41
-51,61	-18,92
-48,46	-20,15
-108,61	-8,99

Taula 8.5 Càlcul del pay-back per els dos escenaris.

Analitzant els resultats s'observa que només el cas F de l'escenari optimista reporta beneficis econòmics respecte la filtració a pressió convencional, amb un pay-back de 60,48 anys. La resta de casos reporten fluxos de caixa negatius, és a dir l'aplicació de la tècnica d'electro-filtració no surt rentable per a les condicions marcades.

Per tant, les condicions òptimes de treball són les del cas F de l'escenari optimista, en el que es treballa amb una concentració de sal del 0,17%, 30V i una

intensitat mitjana de 1,05 A. En aquest cas s'obté un pay-back de 60,48 anys amb un flux de caixa anual de 16,14 €.

El fet que al aplicar el camp elèctric es disminueixi el contingut d'aigua del tortó format per l'efecte de l'electroosmosi, comporta una reducció considerable dels costos d'eliminació de residu i és on s'obté l'estalvi econòmic respecte la filtració a pressió, donat que el cost d'eliminació de residu (afectat directament per la quantitat de rebuig obtingut) es reduirà. El cost de funcionament, encara que es disminueixin els consums d'electricitat deguts a la reducció del temps de filtració i la conseqüent reducció de l'ús de l'agitador i consum d'aire comprimit, es veuen incrementats a mesura que s'augmenta la intensitat del camp elèctric. Això és degut a que el consum d'energia de l'agitador i el consum d'aire comprimit són molt baixos en front del consum de la font d'alimentació, la substitució periòdica dels elèctrodes i l'addició de sal per augmentar la conductivitat.

Per tal que la nova tècnica fos rentable i a partir dels resultats obtinguts experimentalment, la quantitat de substància a tractar diàriament s'hauria d'incrementar ja que com s'ha comentat els beneficis de la nova tècnica bàsicament estan centrats en la reducció de costos d'eliminació dels residus. Per tant l'equip d'electro-filtració seria més rentable si es tractés més quantitat de substància.

Per exemple: simulant un tractament diari de 5000 L de suspensió en pols al 7% amb un temps de filtració de 400 min per el cas A i mantenint la resta de condicions, el pay-back del cas F és de 1,12 anys i anualment comporta uns beneficis de 873,67 € respecte la filtració a pressió convencional. La següent taula mostra com es distribuïren els costos amb aquestes noves condicions de treball per l'escenari optimista.

ESCENARI OPTIMISTA							
	Cost manteniment (€)	Cost funcionament (€)	Cost eliminació residu (€)	Cost amortització (€)	TOTAL		
<b>A</b>	100,00	3607,70	5633,71	0,00	9341,41		
<b>B</b>	109,29	3637,25	5563,28	41,31	9351,13	<b>Flux caixa (€)</b>	<b>Pay-Back (anys)</b>
<b>C</b>	109,69	3635,50	5431,46	41,31	9217,96	-9,72	-100,45
<b>D</b>	110,64	3633,32	5091,18	41,31	8876,45	123,45	7,91
<b>E</b>	111,83	3708,22	4894,56	41,31	8755,92	464,96	2,10
<b>F</b>	114,38	3869,88	4442,18	41,31	8467,74	585,49	1,67
<b>G</b>	116,92	4268,66	4255,14	41,31	8682,03	873,67	1,12
						659,38	1,48

Taula 8.6 Càlcul del pay-back per l'escenari optimista sota condicions de major quantitat diària a filtrar.

Com es mostra en la taula 8.6, si s'augmenta la quantitat de substància a tractar diàriament, el pay-back de la instal·lació es disminueix i s'augmenten els fluxos de caixa anuals, reportant majors estalvis econòmics.

L'altre factor a tenir en compte són els elèctrodes. Tot i que el preu de la reixeta d'acer no és desmesurat, es podria provar d'utilitzar un altre material que no es descompongués, com per exemple el titani, el carboni o el rodi, que encara que el preu de cost sigui més elevat, si no s'ha de substituir periòdicament poder surt més a compte.

Amb l'objectiu d'incrementar el camp elèctric, s'hauria d'experimentar amb una font d'alimentació que provoqués un voltatge superior per tal de no haver d'afegir NaCl a la mostra i reduir els costos.

Amb totes aquestes consideracions, es pot concloure que l'estudi econòmic ha sortit desfavorable per l'implementació de la tècnica d'electro-filtració en una cristalleria que produeix una quantitat de residu a tractar diàriament baixa, ja que comporta uns fluxos de caixa en els millor dels casos molt petits (de 16,14 €/any) i uns pay-backs molt grans per a una inversió addicional molt petita (976,20 €).

No obstant, com s'ha demostrat en la taula 8.6, si la quantitat de suspensió a filtrar augmenta, la tècnica, degut als bons resultats obtinguts experimentalment, reporta uns beneficis econòmics considerables i uns pay-back molt curts.

Per tant, la conclusió general de l'estudi econòmic és que l'electro-filtració és una tècnica que pot representar beneficis econòmics si es fa una bona selecció d'elèctrodes i s'aplica en un procés on es tractin grans quantitats de substància rebuig a assecar diàriament, com podria ser el tractament de fangs de depuradora.

## CAPITOL 9 : CONCLUSIONS I RECOMANACIONS

### 9.1 Conclusions:

Els resultats obtinguts són molt satisfactoris. Partint d'un pressupost relativament baix s'ha arribat a muntar un electro-filtre que ha permès comprovar que la tècnica d'electro-filtració, tal i com han demostrat altres investigadors, permet obtenir millors resultats que la filtració a pressió convencional. Experimentant amb la pols de vidre, s'ha arribat a reduir en un 52% el temps de filtració i s'ha augmentat un 17,6% el contingut de matèria seca del tortó format arribant a valors del 68,39% en MS.

Analitzant l'evolució de les característiques del filtrat i del tortó format abans i després d'aplicar el camp elèctric de les diverses mostres (pols de vidre, puré de patata, concentrat de verdures i ciment), s'ha demostrat que aquesta tècnica, degut a les reaccions electrolítiques i oxidacions de l'ànode, no és aplicable per aquell tipus de processos en els que el tortó format no és un rebuig, com podrien ser indústries alimentàries, farmacèutiques o químiques. Per tant, l'electro-filtració, sota les condicions de treball d'aquest projecte, només és aplicable per processos on interressi reduir el contingut de líquid d'una suspensió, per tal d'obtenir el sòlid el més sec possible per ser eliminat, o per aquells processos on no importi que s'alterin les propietats del sòlid obtingut. Aquest és el cas per exemple de les depuradores, on aquesta tècnica mica en mica s'està introduint.

El model matemàtic també s'ha demostrat a partir dels resultats experimentals. Per una banda s'ha determinat que tal i com descriuen les equacions 2.2 i 2.3, l'efecte de l'electroosmosi i l'electroforesi són directament proporcionals als valors del camp elèctric creat. S'ha observat visualment, que a partir d'un voltatge de 30 V, l'efecte de l'electroforesi és visible i les partícules de pols de vidre tendeixen a pujar cap a l'ànode formant una capa i reduint el gruix del tortó. També s'han complert les lleis de Faraday per l'electròlisi, ja que al augmentar l'electricitat aplicada sobre els elèctrodes, mitjançant l'anàlisi de l'evolució del pH, s'ha demostrat que augmenta les reaccions electrolítiques que alliberen  $H^+$ ,  $OH^-$ . De forma qualitativa també s'ha observat que al augmentar la intensitat de camp elèctric, com a producte de l'electròlisi, es produeix gas ( $O_2$  i  $H_2$ ).

Fent menció a l'estudi econòmic, aquest no ha sortit del tot favorable per a la implementació d'aquesta tècnica en una cristalleria amb poca generació de pols de vidre. Tal i com s'ha comentat, sota les condicions de treball de l'electro-filtre muntat, la tècnica només és viable econòmicament si es disposa d'una gran quantitat diària de

substància a filtrar. Aquesta condició és deguda a que el cost de funcionament, tot i que es disminueix el temps que s'ha d'aplicar aire comprimit per donar pressió, no es redueix amb l'electro-filtració, ja que el cost de l'electricitat consumida per la font d'alimentació és superior a l'estalvi provocat per la disminució del temps d'ús de l'agitador i aplicació d'aire comprimit, i per tant els costos de funcionament s'augmenten enfront de la filtració a pressió convencional. Per contra, els costos d'eliminació de residu es disminueixen, per tant quant més quantitat de substància es filtri, més beneficis s'obtindrà respecte la filtració a pressió convencional i més reduït serà el pay-back de la instal·lació.

Ja per acabar, resumint es pot dir que els resultats obtinguts en l'estudi permeten concloure que l'electro-filtració provoca uns majors rendiments respecte la filtració a pressió. Però deguda a les reaccions electrolítiques que es produeixen, que alteren les propietats de la mostra, i als costos de funcionament més elevats, la tècnica és aplicable per aquell tipus de processos que requereixin una gran quantitat de mostra a tractar diàriament on el tortó obtingut sigui un rebuig, o les propietats del qual puguin ser alterades.

David Martínez Capilla

*Girona, 16/4/2012*

## 9.2 Recomanacions i possibles millores

Un cop terminat el projecte i per ordre de preferència, a continuació s'enumeren els camps d'estudi on es podria treballar per ampliar aquest projecte.

- 1) Primerament la selecció d'elèctrodes. El fet de mantenir un camp elèctric en un electròlit desencadena les reaccions electrolítiques que produeixen  $H_+$ ,  $OH^-$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  i l'oxidació i reducció de l'ànode i el càtode respectivament. Aquest fet és un problema, degut a l'alteració de les propietats del tortó format que impedeixen aplicar aquesta tècnica en processos on aquest no sigui un rebuig. Però aquest problema pot ser resolt emprant altres materials per la construcció dels elèctrodes com podrien ser polímers conjugats [46], que poden reduir considerablement els efectes de l'electròlisi. Un polímer conjugat és un compost orgànic on els àtoms estan units mitjançant enllaços covalents amb enllaços simples i múltiples alternats (per exemple,  $C=C-C=C-C$ ) i amb influència mútua per produir una regió anomenada deslocalització electrònica.

Altres materials que podrien ser emprats, encara que no disminueixin l'efecte de l'electròlisi, podria ser el titani, el rodi, el carbó o l'acer inoxidable. Tot i que el preu d'aquests és més elevat, probablement es redueixen els costos de funcionament provocats per la substitució periòdica de l'ànode degut a l'oxidació de l'acer.

- 2) En segon lloc, augmentant el pressupost establert, valdria la pena millorar la instal·lació de l'electro-filtre per obtenir un sistema estanc en el qual es pogués treballar a pressions majors d'1 bar. Aquesta millora, permetria aproximar-se més al cas real de la indústria on es treballen amb pressions de l'ordre de 7-10 bars. Un altre punt a millorar és l'enregistrament de dades. Es podria disposar d'una balança electrònica d'alta precisió que connectada a un ordinador amb el programa adequat, enregistres les dades automàticament, per tal d'evitar els errors, variacions i baixos coeficient de regressió provocats per l'error i possibles variacions en la lectura.
- 3) Ja per acabar, seria interessant estudiar com afecta el valor del pH en el potencial zeta i a l'hora com afecta el potencial z en l'efecte de l'electroosmosi i l'electroforesi. Són dos paràmetres que com s'ha demostrat estan directament relacionats amb els fenòmens electrocinètics i per tant molt interessant estudiar quins efectes provoquen sobre els resultats obtinguts en l'electro-filtració.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] Hetah L.W i Demirel T. "*Pressurized electro-osmotic dewatering*" (1984).
- [2] Kondoh S i Hiraoka M. "*Commercialization of pressurized electro-osmotic dehydrator*". (1990) *Water Science and Technology*, 259-268.
- [3] Yoshida H i Yukawa H. "*A theoretical analysis of the electroosmotic dewatering of sludge*". (1988) *International Chemical Engineering*, 477-485.
- [4] Golla, P.S, Johnson H.W i Senthilnathan P.R. "*Application of electroacoustics for dewatering pharmaceutical sludge*". (1992) *Environmental Progress*, 74-79.
- [5] Gingerich I, Neufeld R.D i Thomas T.A. "*Electroosmotically enhanced sludge pressure filtration*". (1999) *Water Environmental Research*, 267-276.
- [6] Laure O, Mouroko-Mitoulou T i Vorobiev E. "*Pressurized electroosmotic dewatering in a filter cycle*". (2001) *Drying Technology*, 2363-2377.
- [7] Raats M.H.M, Van Diemen A.J.G, Laven J., i Stein H.N. "*Full scale electrokinetic dewatering of waste sludge*". (2002) *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects* 231-241.
- [8] K. Weber , W. Stahl. "*Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration*". (2002) *Separation and Purification Technology* 69–80.
- [9] Adi Permadi, Gede Wenten. "*Enzyme separation and purification using electro-filtration*". (2010) *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*.
- [10] Hiroshi Yukawa, Kazumasa Kobayashi, Yutaka Tsukui, Shigeru Yamano i Minoru Iwata. "*Analisis of batch electrokinetic filtration*". (1975) *Journal of chemical engineering of Japan*.



- [11] Saveyn H., Weber K., Hoffman R., De Visscher A., De Baets B., Van der Meeren P., Stahl W. "*Two-sided electrofiltration of yeast suspensions ltration kinetics and physiological impact*". (2002) In Proceedings of the International Conference on Emerging Solid/Liquid Separation Technologies, Compiègne, France.
- [12] Jena-Louis Salanger. "*Fenómenos electrocinéticos*". (1988).
- [13] Helmholtz H., Wiedemanns Annalend. (1879) Physik, Vol 7.
- [14] Gouy G. "*Sur la constitution de la charge électrique a la surface d'un électrolyte*". (1910) Annuel Physique, Vol 9, 457-468.
- [15] Chapman D.L. "*A contribution to the theory of the electrocapillarity*". (1913) Philosophical Magazine, 475-481.
- [16] Reuss F.F. "*Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique*". (1807) Mémoires de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou, Vol 2, 327-337.
- [17] Hiemenz P.C., Rajagopalan R. "*Principles of Colloid and Surface chemistry*". (1997).
- [18] Rosemary Gene, Ihde, Aaron. "*Faraday's Electrochemical Laws and the Determination of Equivalent Weights*". (1954) Journal of Chemical Education.
- [19] Yoshida H. "*Practical aspects of dewatering enhancec by electro-osmosi*". (1993) Drying Technology 787-814.
- [20] Gazbar S, Abadie J.M I Colin F. "*Combined action of electro-osmotic drainage and mechanical compression on sludge dewatering*". (1994) Water Science and Technology, 169-175
- [21] Banerjee S I Law S.E. "*Electroosmotically enhanced drying of biomass*". (1998) Transactions on Industry Applications, 992-99.
- [22] Barton W.A, Miller S.A I Veal C.J. "*The electrodewatering of sewage sludges*". (1999) Drying Technology, 497-522.

- [23] Hansen H.K, Kristensen I.V, Ottosen L.M I Villumsen A. "*Electroosmotic dewatering of chalk sludge, iron hydroxide sludge, wet fly ash and biomass*". (2001) III Symposium and Status Report on Electrokinetic Remediation.
- [24] Zhou J., Liu Z. She P., I Ding F. "*Water removal from sludge in a horizontal electric field*". (2001) Drying Technology, 627-638.
- [25] Javier Hernandez Borges. "*Nuevas metodologías de análisis de pesticidas por electroforesis capilar*". (2005).
- [26] Luciano Sandoval Yoval, Leticia Montellano Palacios, Martín Piña Soberanis i Laura Olivia, Sánchez Guzmán. "*Potencial zeta como una herramienta para la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen de lodo a dispoñer*". (1999).
- [27] Gordon C.C. Yang, Min-Cong Chen, Chun-Fu Yeh. "*Dewatering of a biological industrial sludge by electrokinetics-assisted filter press*". (2011) Separation and Purification Technology 79 177-182.
- [28] Akrama Mahmoud, Jeremy Olivier, Jean Vaxelaire, Andrew F.A. Hoadley. "*Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects*". (2011) Water research, 45, 2795-2180
- [29] M. Citeau, O. Larue, E. Vorobiev. "Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge". Water research 45, 2167-2180.
- [30] Hans SAVEYN. "*Modelling and optimization of sludge conditioning and electrical field assisted dewatering*". (2004).
- [31] Mok Chi Kit. "*Design and modeling of electroosmotic dewatering*". (2006).
- [32] John O .M Bockris,Amulya K. N. Reddy. "*Electroquímica moderna*".
- [33] Jose Luís Fernandez Ruíz. "*Elementos de física para las ciencias de la vida*".

- [34] Rodrigo Moreno Botella. “*Reología de suspensiones cerámicas*”.
- [35] M.E Aulton. “*Farmacia. La ciencia del diseño de las formas farmacéuticas*”.
- [36] Albert Ibarz y Gustavo V. Barbosa-Cánovas. “*Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*”.
- [37] Rao D.G. “*Fundamentals of Food Engineering*” 409-419.
- [38] P.J RAPIN P. JACQUARD. “*Instalaciones Frigoríficas*”.
- [39] Pràctica FILTRACIÓ nº 25. Experimentació en Enginyeria Química MODUL III: Operacions bàsiques a l'enginyeria.
- [40] [http://www.hannaarg.com/productos/Catalogo/Turbidimetros/Sobremesa/m\\_LP2000.pdf](http://www.hannaarg.com/productos/Catalogo/Turbidimetros/Sobremesa/m_LP2000.pdf).
- [41] [www.crisoninstruments.com/file.php?id=279&lang=es](http://www.crisoninstruments.com/file.php?id=279&lang=es).
- [42] <http://www.crisoninstruments.com/index.php?module=1&idParam=10&idFam=39&idSubFam=39&idProd=144&lang=es>.
- [43] <http://www.crisoninstruments.com/index.php?module=1&idParam=13&idFam=47&lang=es>.
- [44] <http://www.grupo-selecta.com/es/noticias/ver/42/ESTUFAS%20PARA%20LABORATORIO>.
- [45] <http://lepamap.udg.edu/cat/index.htm>
- [46] <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/publicados/choy.pdf>

## **AGRAÏMENTS**

No voldria donar per finalitzat aquest projecte final de carrera sense abans agrair a tothom que m'ha ajudat, recolzat i aconsellat en la realització d'aquest treball.

En especial vull agrair al meu tutor, el Dr. Xavier Llauró, per el suport i consells donats i la seva bona disposició a ajudar-me.

En segon lloc agrair al grup LEPAMAP que m'hagin deixat disposar del laboratori d'enginyeria paperera per a la realització de les experimentacions.

Ja per acabar, agrair a la Sra. Anna Maria Aymerich i a la Sra. Núria Cabezas per la seva atenció a l'hora de facilitar-me el material i instruments de laboratori necessaris per a realitzar les analítiques.