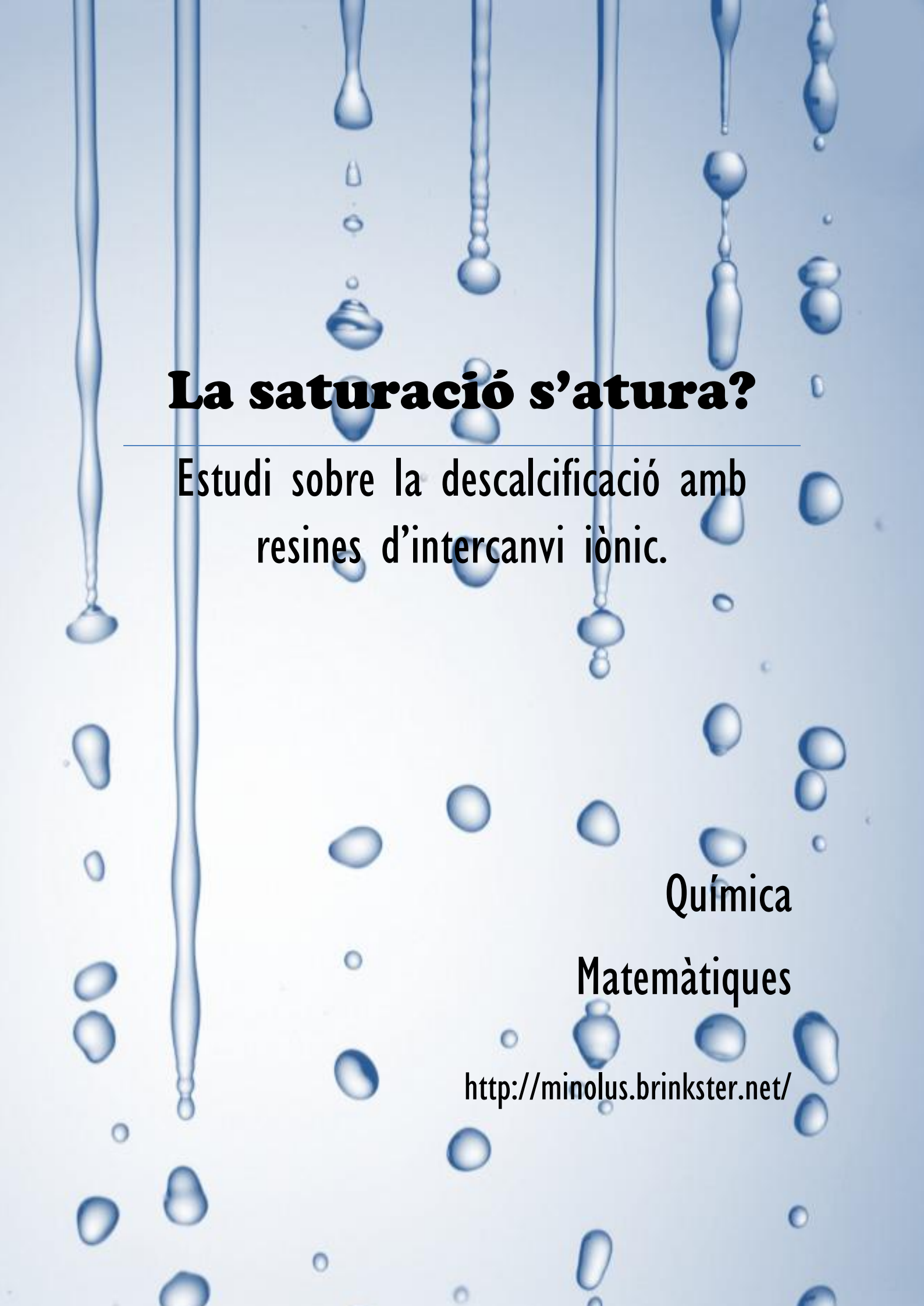


The background of the slide is a light blue gradient with numerous water droplets and streams of varying sizes and shapes, creating a dynamic, fluid-like effect.

La saturació s'atura?

Estudi sobre la descalcificació amb
resines d'intercanvi iònic.

Química

Matemàtiques

<http://minolus.brinkster.net/>

Índex

1. Introducció.....	5
1.1 Elecció del treball	5
1.2 Objectius.....	6
1.2.1 Ús de les noves tecnologies	7
1.3 Hipòtesis	8
2. Fonament teòric.....	11
2.1 L'aigua	11
2.1.1 Estructura.....	11
2.1.2 Paràmetres que determinen la seva qualitat	12
➤ Paràmetres físics	12
➤ Paràmetres químics	12
2.2 La descalcificació:	16
2.2.1 Resines d'intercanvi iònic	16
2.2.2 Osmosi inversa	17
2.2.3 Mètodes elèctrics	18
➤ Electrodialisi	18
➤ Electrodialisi inversa.....	18
➤ Electrodesionització	18
2.2.4 Inhibidors electrònics	18
3. Construcció i anàlisi d'un prototip d'intercanviador iònic	19
3.1 Principis	19
3.2 Fase tecnològica	20
3.2.1 Precedents	20
3.2.2 Avantprojecte.....	20
3.2.3 Construcció 1	22
➤ Materials	22
➤ Procediment.....	22
3.2.4 Revisió.....	22
3.2.5 Construcció 2	24
➤ Materials	24
➤ Procediment.....	24
3.2.6 Revisió 2	24
3.3 Fase científica.....	25
3.3.1 Metodologia.....	25
➤ Manipulació dels paràmetres del descalcificador	25
➤ Factors a considerar	26
➤ Intervals utilitzats	27
➤ Anàlisi de la duresa.....	27
➤ Càlculs	30
3.3.2 Resultats	33

3.3.3 Tractament matemàtic	34
➤ Variables	34
➤ Funció logística	35
➤ Resultats (duresa).....	37
3.3.4 Interpretació	40
3.3.5 Discussió	41
➤ Contrastar els resultats teòrics amb els pràctics	41
➤ Extrapolar i predir el comportament de la resina.....	41
4. Conclusions.....	43
5. Bibliografia	48
5.1 Llibres consultats.....	48
5.2 Pàgines web	49
6. Agraïments.....	50
7. Annexos.....	52

1. Introducció

1.1 Elecció del treball

La primera pregunta que em vaig fer al pensar sobre el treball de recerca va ser: Sobre què el faig? No era una pregunta de fàcil resposta. Ara bé ¿per què vaig decidir elaborar un estudi sobre les resines d'intercanvi iònic i la seva evolució al llarg del seu cicle d'ús; amb aplicacions pràctiques al camp de la descalcificació? L'explicació és extensa.

Al començament, només tenia una idea clara, volia fer un treball científic: volia aplicar tots els meus coneixements en un tema nou, on pogués extreure les meves pròpies conclusions. Però la ciència és molt àmplia, i jo em sentia aclaparat davant de totes les opcions disponibles.

Volia que el meu treball tingués una part pràctica, de treball al laboratori, perquè tenia la intenció d'aprendre com s'hi treballava. Però tampoc no pretenia que el meu treball es limités a fer proves i més proves: havia de fer una anàlisi profunda dels resultats. Igualment, preferia que el camp que estudiés fos accessible, que tingués una gran varietat de fonts d'informació. Tanmateix, el meu objectiu era aportar quelcom mínimament nou, intentar innovar dintre del possible. Per últim, desitjava que el meu treball resultés interessant i proper a qui el llegís.

Ple de dubtes, vaig decidir demanar consell a tothom. Finalment va ser la meua tutora qui em va donar la idea definitiva: la **descalcificació**. La descalcificació és el procés que permet eliminar o reduir la duresa de l'aigua, és a dir, la concentració de calci i magnesi.

La duresa de l'aigua és una problemàtica comuna a la província de Tarragona: tenim una aigua molt dura producte de la seva extracció subterrània en zones calcàries. Aquest era un tema proper, amb gran informació disponible i, a la vegada, oferia la possibilitat d'innovar: és un tema que ha evolucionat amb el temps, i encara es presta a millores i nous descobriments. Malauradament, el camp de la descalcificació encara era massa ampli; necessitava concretar quin mètode de descalcificació dels existents triaria per fer el meu estudi.

En un principi, la tutora em va recomanar que em centrés en l'ús de resines, una substància sintètica que elimina la duresa. Jo, en canvi, no acabava d'estar convençut del seu potencial. Per això, vaig apostar per fer servir l'**electricitat** (imitant els actuals mètodes elèctrics). Vaig preveure que en 4 mesos (maig-agost) tindria temps més que suficient per construir un descalcificador elèctric, experimentar amb ell i arribar a unes conclusions finals. Malauradament això no va ser així: tots els meus intents (que es recullen extensament en els [annexos](#)) per construir un aparell que funcionés van acabar fracassant. Vaig arribar principis de curs únicament amb la part teòrica completada: havia de fer un altre projecte pràctic.

Com és evident, necessitava estudiar un nou mètode de descalcificació que m'oferís plenes garanties d'èxit. Per aquest motiu, vaig acabar seguint el consell de la tutora i estudiar el **tractament amb resines**.

L'elecció del tema ja estava resolta totalment, ara havia de plantejar-me els objectius de l'estudi.

1.2 Objectius

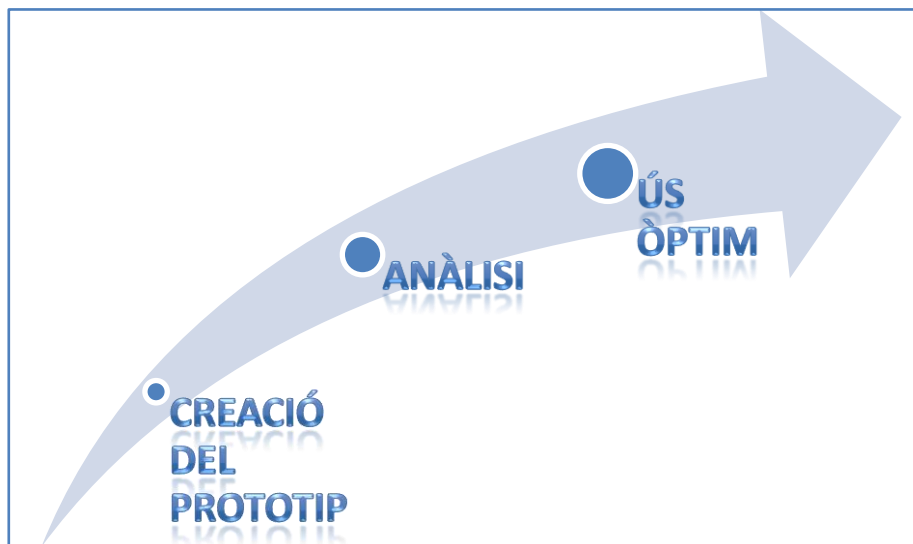
Un tema per sí mateix no és res sense una pauta de treball, uns objectius i unes fites per assolir. Volia estudiar el tractament amb resines, sí, però havia de plantejar-me com ho volia fer.

Si volia estudiar la descalcificació amb resines, el primer que necessitava era un descalcificador. Ja que tenia certa experiència després de quatre mesos de construcció de prototips elèctrics, vaig voler crear un descalcificador propi. Puc dir per tant, que el primer objectiu del treball de recerca era:

- **Construir un descalcificador amb resines eficient.**

Després de construir-lo, hauria de realitzar l'estudi en sí mateix: hauria, per tant, **d'analitzar el seu funcionament per tal de poder donar-li un ús òptim**. Per analitzar-lo calia que establís prèviament les hipòtesis sobre l'evolució dels diversos paràmetres de les resines al llarg del seu ús.

Aquestes hipòtesis parteixen d'un coneixement mínim sobre el funcionament de les resines, coneixement que es pot adquirir consultant la part teòrica del treball, o, si es vol una perspectiva molt més profunda, mirant els annexos, que inclouen un apartat d'ampliació dels conceptes teòrics que resultarà molt interessant als lectors curiosos. En cas de voler més informació, recomano començar per l'extensa bibliografia consultada, que inclou un gran nombre de llibres amb accés parcialment lliure a través d'Internet.



Il·lustració 1 - Esquema del treball de recerca

1.2.1 Ús de les noves tecnologies

Després de llegir alguns treballs de recerca del centre, vaig veure que en la gran majoria hi havia un aspecte que encara es podia explotar més: l'ús de les noves aplicacions informàtiques.

Aquestes eines han tingut una doble funció en aquest treball:

- Per una banda, m'han facilitat l'anàlisi dels resultats obtinguts, ja que els programes que utilitzava em proposaven multitud de models matemàtics que podia seguir la duresa de l'aigua tractada per les resines.
- Igualment, he volgut incorporar animacions, vídeos i hipervincles al treball, de manera que resulti molt més interactiu i, sobretot, entenedor.

Per aquest motiu, recomano molt activament que aquest treball de recerca es visualitzi, almenys una vegada, per ordinador. Si no, el lector perdrà nombrosos continguts que li amenitzarien la lectura i contribuirien a la seva comprensió.

Per accedir a la versió virtual del treball es poden fer servir dues vies: obrir la còpia del treball de recerca en DVD que s'adjunta, o bé consultar la meua pàgina web¹, que inclou una còpia íntegra del treball per a tothom qui ho necessiti i tingui interès a veure'l.

Es pot accedir al contingut multimèdia fent CRT + Clic esquerra sobre les imatges amb el títol animació o vídeo o a les paraules subratllades i de color blau. També s'hi pot accedir des del DVD del treball, tot i que es perd el context del contingut.

Per la realització del treball he fet servir, a banda dels programes típics (world, excel, etc):

- *CurveExpert 1.3 & FindGraph 1.960*: Per manipular matemàticament els resultats.
- *Macromedia Flash Professional 8*: Per fer les animacions.
- *Chemoffice 2005*: Per incorporar fórmules químiques.
- *ACDLabs products (ChemSketch & 3D Viewer)*: Per afegir molècules en moviment.
- *OrCAD 15.7*: Per confeccionar els esquemes elèctrics.
- *AutoCAD 2008*: Per dibuixar els esborranys 3D dels projectes.
- *Pinnacle Studio Ultimate 12*: Per manipular els vídeos del treball.
- *Autoplay Media Studio 7.1*: Per crear el menú del CD.

Recomano visualitzar el treball en format *.docx* y *.xlsx* (Office 2007) per a accedir als vídeos i altres continguts interactius. És preferible no utilitzar la versió *.doc*, doncs pot presentar certs problemes. En tot cas, el treball consta d'una versió en arxiu *.pdf* per facilitar la seva lectura des de qualsevol equip.

¹ <http://minolus.brinkster.net/>

1.3 Hipòtesis

➤ *Hipòtesis inicials*

Al començar el treball vaig plantejar-me un conjunt de paràmetres a estudiar, així com les hipòtesis sobre el seu comportament.

La resina no és eterna, s'esgota. Aquest esgotament progressiu de la resina s'anomena saturació. Volia que una part de l'estudi tractés d'analitzar l'evolució de la saturació al llarg del cicle d'ús de la resina.

Era difícil determinar una hipòtesi sobre el comportament de les resines: aquestes podien imitar molts tipus de comportaments: lineal, on la resina se satura uniformement, exponencial, logarítmica (on se satura de cop), etc.

Finalment, vaig pensar que la resposta més probable seria la més senzilla (és a dir, que la saturació fos constant), així que la meua hipòtesi inicial va ser que:

- El més probable és que la resina se saturi uniformement, pel que el model que descrigui la variació de duresa hauria de correspondre a una funció lineal.

Per saber quina era la duresa al llarg del cicle d'ús de la resina hauria de realitzar proves químiques cada vegada que aquesta hagués tractat certa quantitat d'aigua.

La resina tendeix a eliminar tota la duresa que pot. Malgrat això, una aigua amb una duresa molt baixa (una aigua tova) tampoc no resulta beneficiosa pel seu consum (sí en canvi per a altres camps domèstics), cal trobar un equilibri, una duresa ideal. Aquest valor de duresa òptim correspon a [225mlCaCO₃/L](#).

Vaig creure necessari trobar la quantitat de resina que calia fer servir per dotar a un volum d'aigua determinat d'una duresa ideal. Aquesta quantitat de resina es troba molt relacionada amb la hipòtesi anterior, ja que:

- Si considerem que la resina segueix una evolució lineal en el seu rendiment, llavors, en aquest cas, la quantitat de resina necessària per obtenir una duresa ideal augmentarà proporcionalment al volum d'aigua tractat.

Per comprovar aquesta hipòtesi no calia fer cap prova addicional (apart de per comprovar la hipòtesi anterior): quan sabés l'evolució de les resines al llarg del seu ús, podria predir quanta duresa tindria l'aigua en tot moment, pel que podria saber quan s'apropava aquest valor a la duresa ideal.

Quan la resina elimina la duresa, poden succeir dues coses amb l'aigua tractada: es pot tornar més àcida o bé pot augmentar el seu nivell de sodi.

Aquests dos factors afecten negativament la qualitat de l'aigua, de manera que és possible que l'aigua que hagi tractat la resina, tot i no tenir tanta duresa, no sigui apta pel seu consum o ús. Un sodi massa alt és perjudicial per persones amb la tensió alta, i pot fer malbé els electrodomèstics. Una aigua àcida té un sabor desagradable i és perjudicial per les canonades i la salut.

Si volia fer un estudi en profunditat sobre el tractament amb resines, també havia d'analitzar les seves conseqüències negatives. Si aquest inconvenients superaven els avantatges del mètode, llavors l'ús de resines no compensava.

Amb això vaig pensar dues hipòtesis:

- És possible que l'aigua tractada tingui una qualitat final acceptable.
- Probablement l'aigua tractada tingui un descens en la seva qualitat final massa elevat com per a poder ser utilitzada.

Ara bé, l'anàlisi d'aquests paràmetres resultava un problema: havia de fer un munt de proves per comprovar les dues primeres hipòtesis (vaig arribar a fer-ne més de 400 anàlisis!). Si a més d'analitzar la duresa, havia de mesurar el nivell de sodi i d'acidesa, no acabaria mai. Com es veurà més endavant, vaig preferir calcular indirectament aquests paràmetres a través de la duresa.

➤ *Hipòtesis posteriors*

Durant la confecció del treball van sorgir altres interrogants, els quals vaig tractar de respondre.

Les resines s'utilitzen en dos grans àmbits: domèstic (tractament de piscines, consum humà...) i industrial (quasi totes les indústries fan servir un mètode de descalcificació o un altre). Aquests dos tipus de resines no són iguals: així, per exemple, l'aigua no destinada a consum humà tractada per les resines catióniques domèstiques té més sodi, i la tractada per les industrials és més àcida.

Però, quines altres diferències hi ha entre aquests dos tipus de resines? Quina és millor? Quina tracta més aigua? Les resines domèstiques passen per uns controls de qualitat més estrictes, pel que la meva hipòtesi inicial era:

- Les resines domèstiques i industrials es fan servir en àmbits diferents, per tant, és raonable que presentin una evolució diferent de la duresa que tracten al llarg del seu ús.

Per corroborar la hipòtesi hauria de treballar amb dos tipus de resines, és a dir, hauria de realitzar totes les proves i anàlisis posteriors per duplicat, a una resina industrial i a una de domèstica: només així veuria les diferències entre elles.

Al llarg del treball em vaig plantejar una altra qüestió a estudiar: què determina la qualitat d'una resina?

Les resines estan constituïdes de petits components químics (polímers). Un major percentatge d'un o altre component dóna a la resina diferents propietats.

Vaig voler centrar-me en la variació de la qualitat de la resina segons el percentatge de [divinilbenzè](#) (un polímer comú en quasi totes les resines). Segons això, existeixen dues possibles hipòtesis

- El divinilbenzè augmenta la qualitat de la resina.
- El divinilbenzè disminueix la qualitat de la resina.

Aquestes hipòtesis suposen un problema, i és que no tinc cap mena de mètode per quantificar el percentatge de divinilbenzè de la resina. Afortunadament, vaig poder fer servir un altre concepte per aclarir aquesta hipòtesi: el divinilbenzè disminueix la capacitat d'intercanvi de la resina, pel que la que tingui més divinilbenzè se saturarà més tard.

- Si la resina que se satura més tard té una major qualitat, llavors el divinilbenzè augmentarà la qualitat de la resina.
- Per contra, si succeeix el contrari, el divinilbenzè afectarà negativament en la qualitat de la resina.

2. Fonament teòric

2.1 L'aigua

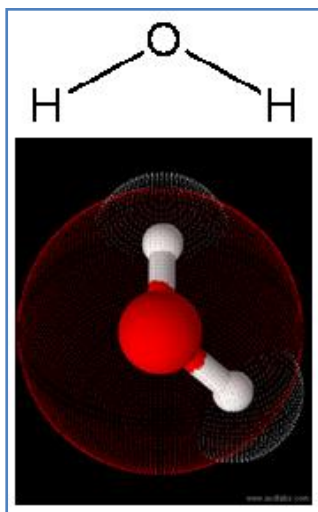
L'aigua és un compost de vital importància: és el component majoritari del nostre cos i presenta un conjunt de propietats que la fan única.

Per iniciar aquest treball de recerca cal fer unes breus consideracions sobre l'aigua.

2.1.1 Estructura

L'aigua és un compost format per dos àtoms de H i un d'O units per enllaços covalents i disposats en una estructura plana triangular de 104.45° .

L'àtom d'oxigen atreu més fortament els electrons que no els d'hidrogen, ja que aquests són menys electronegatius; aquest fet crea un enllaç amb dipol, el qual, unit a la presència de forces de repulsió de 2 parells d'electrons no enllaçants, confereix a l'aigua una estructura polar.



Animació 1 - Estructura de l'aigua

Aquesta estructura la converteix en un dissolvent universal (dissol totes les substàncies polars). A més, presenta interaccions intermoleculars amb ponts d'hidrogen (entre àtoms d'hidrogen i oxigen de molècules diferents), el qual li confereix una major cohesió interna (punts de fusió i ebullició més elevats).

L'aigua pura és líquida, insípida inodora i no condueix la electricitat.

Però l'aigua pura no existeix a la natura: és un gran dissolvent, pel que incorpora altres substàncies: cations, anions, pesticides, microorganismes, etc. Aquests factors donen a les diferents aigües unes propietats diverses.

2.1.2 Paràmetres que determinen la seva qualitat

Existeixen un conjunt de característiques físiques, químiques i biològiques que ens donen informació sobre la qualitat de l'aigua. Les propietats que es descriuen ara corresponen a aquelles que tenen relació amb el tractament amb resines, així que vertebrar el treball.

➤ Paràmetres físics

Sabor i olor

El sabor i la olor no es poden mesurar objectivament: depenen dels òrgans de qui els analitza. Per norma general, l'aigua sol tenir un sabor refrescant i és inodora. Nogensmenys, la presència elevada de clor, sulfats o fenols donen un sabor i olor salats, amargs o desagradables. El CO₂ lliure en l'aigua li dona un toc picant: per això s'utilitza en moltes begudes i refrescos.

Color

El color de l'aigua es veu determinat per l'espectre visible que absorbeix. L'aigua pura té un to blavós només a grans profunditats. Per norma general, el color de l'aigua ve determinat pels components del sòl on es troba: per exemple, el ferro li dona un color més vermellós.

El color de l'aigua és també un factor estètic que afecta la seva potabilitat. Per tractar-lo normalment s'utilitza la cloració, la filtració, la coagulació² i els filtres de carbó actiu³, entre altres.

➤ Paràmetres químics

pH

Les solucions aquoses contenen ions H⁺ i OH⁻. Segons la seva concentració, la solució tindrà un caràcter àcid o bàsic respectivament. Això confereix certes propietats a la dissolució.

El pH (potencial d'hidrogen) expressa la concentració d'ions H⁺ que es troben en dissolució aquosa. Podem definir el pH com el logaritme invers de la concentració d'ions:

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log[H^+]$$

Així, una concentració de 10⁻⁵ H⁺ M s'expressarà com:

$$pH = \log \frac{1}{[10^{-5}]} = -\log[10^{-5}]$$
$$pH = 5$$

² Coagulació: Procés en què partícules mesoscòpiques (col·loides) s'uneixen formant agregats de major grandària que posteriorment es fan precipitar.

³ Carbó actiu: Conjunt de materials carbonosos amb gran capacitat d'absorció.

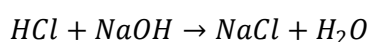
Podem classificar les solucions en funció del seu pH en:

pH	Tipus de solució
<7	Àcida
7	Neutra
>7	Bàsica

Taula 1 - Tipus de solucions segons pH

L'aigua potable té un pH que oscil·la entre 6 i 8. L'aigua pura té un pH de 7.

Quan un àcid i una base reaccionen, es forma una sal i aigua. Per exemple:



Segons la teoria de *Lewis*, definim un àcid com aquella substància que pot rebre un parell d'electrons. Les substàncies àcides es caracteritzen per tenir un sabor àcid, dissoldre els metalls i canviar el color de certs indicadors.

Les bases són substàncies capaces de cedir un parell d'electrons. Les bases tenen sabor amarg, condueixen l'electricitat en solució, són de tacte suau (sabó), no reaccionen amb metalls i acostumen a ser corrosives per la pell.

Com és evident, a mesura que l'aigua que s'allunyi de pH = 7 presentarà pitjor qualitat.

Duresa

Definim la duresa com la quantitat total d'ions multivalents presents en l'aigua. Aquests ions substitueixen els ions de sodi i potassi dels sabons, formant precipitats. A més reaccionen amb certs anions, provocant incrustacions que afecten les canonades.

Els ions multivalents de magnesi i calci són els més abundants amb diferència: és per això que la seva concentració (expressada bàsicament en mgCaCO_3/l o en graus hidromètrics) és equivalent a la duresa total. La duresa càlcica serà la concentració d'ions calci, i la magnèsica, la del magnesi.

Segons el nivell de duresa es diferencien 4 tipus d'aigua:

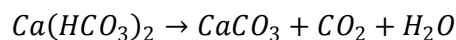
Duresa (°Hf)	Tipus d'aigua
<10	Tova
11-20	Semitova
21-30	Semidura
>30	Dura

Taula 2 - Tipus d'aigua segons duresa

Podem distingir dos tipus de duresa:

Duresa temporal o carbonatada

- Formada per les sals bicarbonatades de magnesi i calci.
- Amb temperatura elevada, el bicarbonat es descompon en diòxid de carboni i carbonat de calci, que es torna insoluble i precipita formant incrustacions.



- Aquesta duresa es pot eliminar per ebullició.
 - o Deixa els típics fons blancs de les teteres i altres utensilis de cuina.



II-lustració 2 - Incrustacions de duresa

Duresa permanent o no carbonatada

- Aquella duresa deguda a sals no bicarbonatades com ara sulfats, clorurs o nitrats (principalment CaSO_4); això és, sals solubles.
- S'anomena permanent perquè no s'elimina amb ebullició.

Les aigües massa dures poden provocar problemes a l'àmbit industrial a causa del seu caràcter incrustant. Una aigua massa tova, en canvi, presenta una gran agressivitat (ataca sòlids com ara ciment i derivats).

Paràmetre	Valor recomanat	
	mmol/l	mg/l
Calci	1	25
Magnesi	1,25	50
Duresa total (CaCO_3)	2,25	225

Taula 3 - Duresa recomanada

Tanmateix, tot i que la Organització Mundial de la Salut no estableix cap paràmetre orientatiu, certes investigacions⁴ apunten una aigua idònia pel consum d'entorn a $225\text{mgCaCO}_3/\text{L}$:

⁴ La mateixa OMS en fa referència al seu informe:

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/nutrientschap12.pdf

És per aquest motiu que la **descalcificació**, el conjunt de tractaments físics o/i químics per disminuir la duresa, són una necessitat.

Tot i que he expressaré la duresa majoritàriament en mgCaCO_3 , i algunes vegades en graus francesos ($^\circ\text{Hf}$), he cregut convenient mostrar una taula de conversions a altres unitats, sent les més importants les dues que utilitzo.⁵

	$^\circ\text{Hf}$	mgCaCO_3/L	ppm	$^\circ\text{d}$	meq	gpg
$^\circ\text{Hf}$	—	10		0,56	0,2	0,58
mgCaCO_3/L	0,1	—		0,056	0,02	0,058
ppm			—			
$^\circ\text{d}$	1,78	17,8		—	0,358	1,04
meq	5	50		2,8	—	2,9
gpg	1,72	17,2		0,96	0,34	—

Dividir

Multiplicar

$^\circ\text{Hf}$	Graus francesos
ppm	Parts per milió
$^\circ\text{d}$	Graus alemanys
meq	Miliequivalent
gpg	Graus americans

Taula 4 - Unitats de duresa i equivalència entre elles

Sodi

El sodi és un element molt abundant en l'aigua. Té una gran importància tant en els humans (ajuda a mantenir la composició de fluids interns i permet el funcionament de nervis i músculs) com en l'agricultura (afecta el sòl).

El sodi, junt amb el clor, és el que confereix a l'aigua un gust salat.

La OMS recomana un màxim de 200mg/l.

⁵ Taula extreta de ATH.

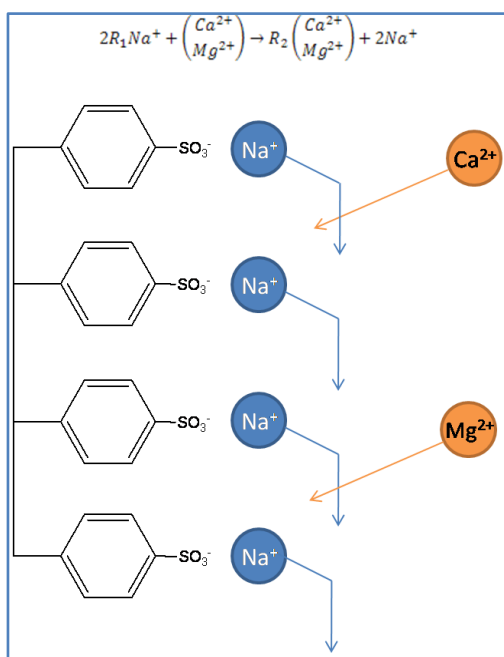
2.2 La descalcificació:

Els [annexos](#) inclouen una informació molt més ampliada sobre la descalcificació. El que es mostra a continuació és un breu resum del més essencial per comprendre el treball.

Hi ha una gran varietat de mètodes que actualment s'utilitzen per evitar els efectes nocius de la duresa. Per norma general, els mètodes de descalcificació eliminen els ions de calci i magnesi, tot i que existeixen excepcions. Els més importants són les de resines d'intercanvi iònic i les membranes semipermeables de l'osmosi inversa.

Per tal d'entendre aquest projecte científic-tecnològic cal conèixer mínimament els diversos tractaments:

2.2.1 Resines d'intercanvi iònic



Animació 2 - Esquema de l'intercanvi iònic

Com el seu nom indica, el intercanvi iònic és el pas d'ions d'un lloc a un altre. Les resines iòniques retenen el calci i el magnesi de l'aigua i alliberen H^+ o Na^+ .

Una vegada s'han intercanviat tots els ions de H^+ o Na^+ per Ca^{2+} i Mg^{2+} , la resina se satura, deixa de tenir capacitat d'intercanvi. Per renovar el procés cal iniciar un procediment invers: afegir una solució amb sal (o un àcid en certes resines) anomenada salmorra. Durant la fase de salmorra la resina reté el sodi i allibera la calci i magnesi: la fuga de duresa resultant fa que l'aigua no sigui apta pel seu ús.

Les resines actuals acostumen a estar compostes de divinilbenzè i estirè. Segons la seva proporció, hi ha diferents tipus de resines amb diferent capacitat d'intercanvi, selectivitat i característiques físiques i químiques. Així, una resina amb un major percentatge de divinilbenzè té menor capacitat d'intercanvi.

Les resines s'utilitzen a l'àmbit domèstic i industrial de diferents maneres: a l'àmbit domèstic de cara a usos no vinculats amb el consum es fa servir resina que allibera sodi (*reestovament* de l'aigua) per disminuir la duresa; pel consum humà s'utilitzen resines amb grups hidrogen (com les de les conegudes gerres *Brita*), que comporten un augment d'acidesa; aquest augment es pot equilibrar amb una altra resina de diferent naturalesa.

A l'àmbit industrial se sol optar per una combinació de resines aniòniques i catiòniques per desionitzar l'aigua.

El suport de la resina pel seu ús (dispositiu en què es troben), és sempre el mateix: un dipòsit on emmagatzemar les resines, un altre on es prepara la salmorra i una vàlvula que regula l'equip. Malgrat això, els muntatges particulars no professionals poden ser més simples; només cal un tanc amb les resines i una aixeta a la part inferior per on surti l'aigua tractada.



Il·lustració 3 - Resina

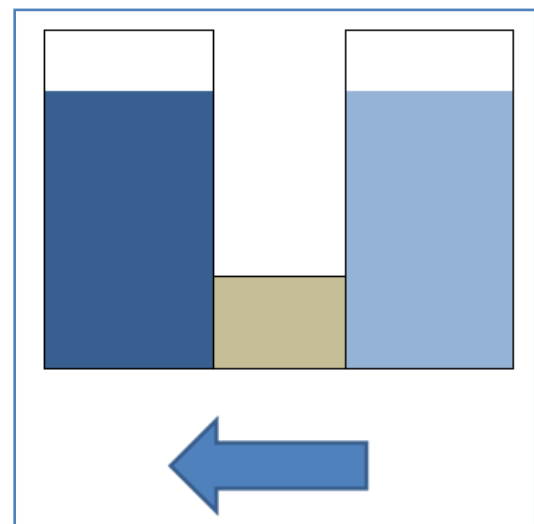
2.2.2 Osmosi inversa

El fenomen de l'osmosi és simple: donat un fluid separat per una membrana semipermeable, aquest tendeix a desplaçar-se de la solució més diluïda a la més concentrada per equilibrar concentracions. Si apliquem una determinada pressió (anomenada pressió osmòtica), es pot impedir aquest procés o fins i tot invertir-lo en el que es coneix com osmosi inversa.

Amb aquest procés, s'acumula un volum d'aigua purificada a una banda de la membrana. Aquesta aigua pot ser utilitzada en l'àmbit domèstic o industrial.

Les membranes utilitzades en tots aquests processos són molt sensibles a la contaminació orgànica. Per aquesta raó, els tractaments amb osmosi inversa van precedits d'altres que eviten un ràpid deteriorament de la membrana (com el carbó actiu).

Homòlogament a les resines, existeixen una gran varietat de membranes de diferent composició i forma que donen presenten diferents característiques (pressió suportable, volum d'aigua tractat, etc.)



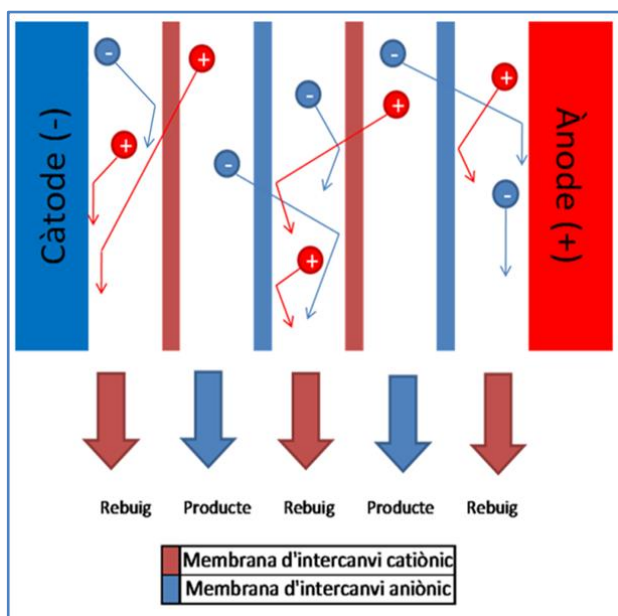
Animació 3 - Esquema de l'osmosi inversa

2.2.3 Mètodes elèctrics

Els ions tenen càrrega elèctrica. Si els fem circular a través d'un camp elèctric, els cations es desplaçaran cap el càtode i els anions cap l'ànode. Aquest és el principi del següents mètodes:

➤ *Electrodiàlisi*

Els ions s'acumulen en certes regions de la canonada gràcies a la presència de membranes iòniques. Aquestes membranes poden tenir naturalesa catiònica o aniònica i només deixen circular a través seu a cations o anions respectivament. Amb aquesta redistribució dels ions es creen compartiments desionitzats.



Animació 4 - Esquema de l'electrodiàlisi

➤ *Electrodiàlisi inversa*

Per tal de facilitar el manteniment de l'electrodiàlisi, l'electrodiàlisi inversa inverteix cada cert temps la polaritat dels electrodos causants del camp: els mateixos ions mantenen el sistema.

➤ *Electrodesionització*

S'incorporen resines d'intercanvi iònic entre les diferents membranes: així, el tractament és molt més efectiu.

Els mètodes elèctrics requereixen més espai (estan limitats a la indústria) i han perdut importància en els últims anys.

2.2.4 Inhibidors electrònics

Els inhibidors magnètics **no** eliminen la duresa, però eviten els seus efectes perjudicials.

El carbonat càlcic (CaCO_3) es forma a causa de l'energia calorífica aportada per les resistències dels sistemes elèctrics (de rentadores, per exemple), incrustant-se en el sistema, disminuint el seu rendiment i suposant un problema a llarg termini.

Els inhibidors aporten energia als ions calci, magnesi, bicarbonats i carbonats. Aquesta aportació energètica forma CaCO_3 tot alterant la seva estructura tridimensional i evitant que s'incrusti.

3. Construcció i anàlisi d'un prototip d'intercanviador iònic

Projecte científic-tecnològic

En un principi, vaig voler centrar la meua part pràctica en els tractaments elèctrics: primer volia crear un aparell que produís alt voltatge i després analitzar el seu impacte en el tractament de la duresa.

Després de nombroses temptatives sense èxit, vaig optar per un projecte més segur, les resines d'intercanvi iònic.

3.1 Principis

El tractament domèstic d'aigua amb resines inclou camps tan diversos com les piscines i el consum humà. Certes dades de les resines pertanyen a l'àmbit científic, pel moltes vegades desconexem exactament les seves especificacions tècniques i ens limitem a utilitzar-les de manera intuïtiva, sense arribar al seu màxim rendiment; o bé simplement seguint les directrius del proveïdors sense saber ben bé per què. En aquest projecte vull trencar amb aquest esquema.

Com el seu nom indica, l'objectiu del projecte científic-tecnològic és doble:

1. Té una vessant tecnològica, on explicaré com he construït el descalcificador domèstic per la resina.
2. També està constituït per una part científica, on experimentalment tractaré de trobar certs paràmetres de la resina adquirida, per tal de millorar-ne el seu ús.

3.2 Fase tecnològica

3.2.1 Precedents

Els descalcificadors domèstics són molt senzills de construir: simplement cal disposar d'un recipient acoblat a una aixeta. És a dir, un orifici d'entrada i un orifici regulable de sortida. Després, l'usuari posa les resines dins del recipient, hi afegeix aigua, espera un temps prudencial, obre l'aixeta i recull l'aigua tractada. La regeneració de les resines es fa en una única direcció i en dos fases: incorporació de la salmorra i rentat ràpid (aportar un flux ràpid d'aigua per eliminar restes de sal).

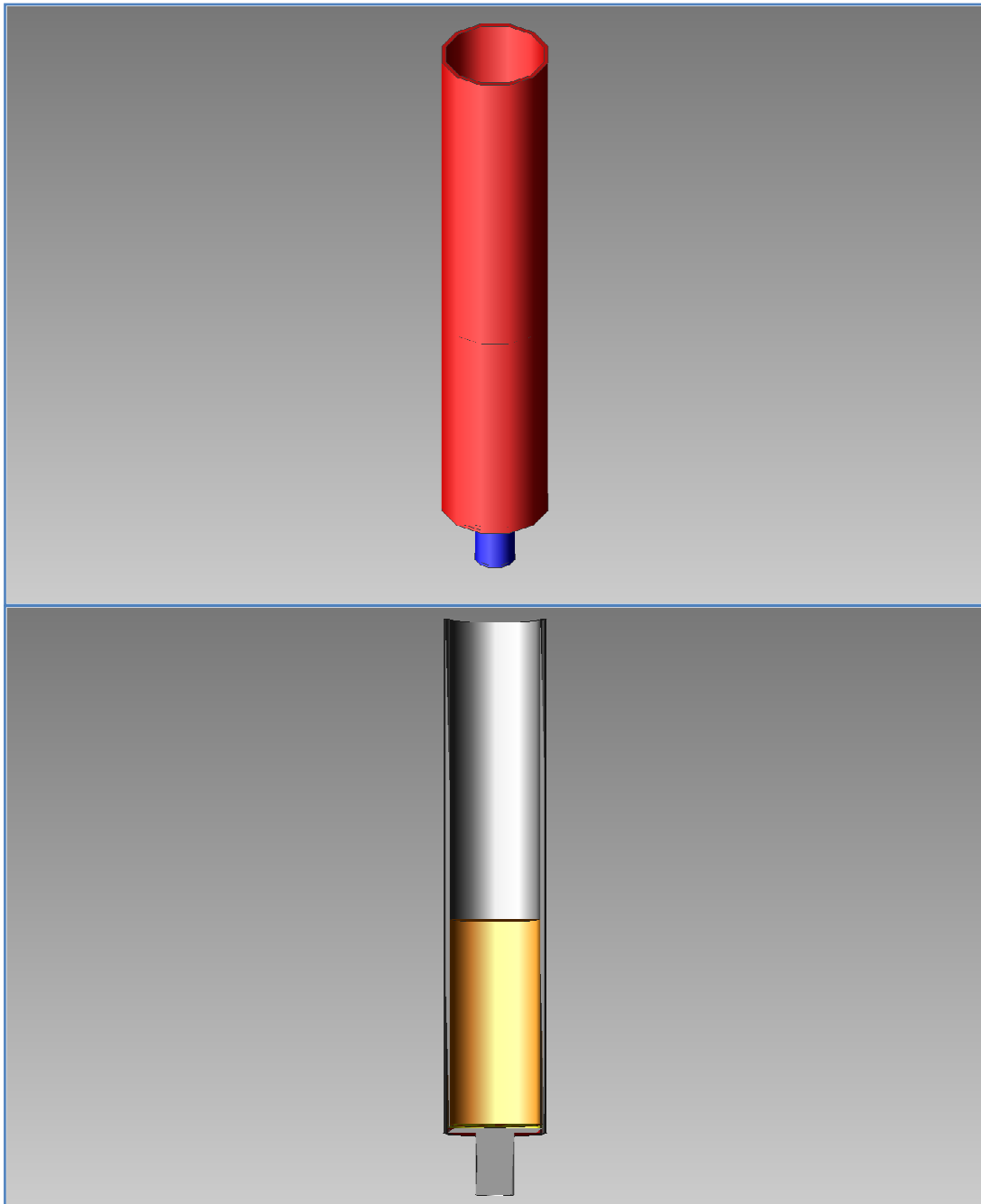
Tot i així, es possible que el meu descalcificador, que ha de complir certs requisits especials (per tal de fer la seva anàlisi més senzilla), sigui una mica diferent.

3.2.2 Avantprojecte

Amb les premisses dels precedents, vaig imaginar les característiques del meu suport on utilitzar les resines.

1. Per tal de distribuir homogèniament la resina, una fàcil manipulació, i una raó estètica, volia un descalcificador en forma cilíndrica.
2. Per motius econòmics i de temps, no volia haver d'utilitzar grans volums d'aigua. El suport havia d'ésser relativament petit. Tanmateix, calia que l'aigua no impactés directament sobre la resina (ja que la desplaçaria, alterant la seva disposició al descalcificador i això podria influir en els resultats), sinó que havia de caure sobre un petit dipòsit d'aigua; per tant, el disseny havia de ser allargat.
3. Ja que el meu objectiu era establir relacions entre volums de resina i aigua, calia que l'aigua recorregués tota la resina abans de sortir a l'exterior. És per això que el conducte de sortida havia d'estar situat justament al final de tota la resina. Per aquest motiu vaig decidir incorporar una aixeta a la base.
4. La resina podria sortir per l'aixeta per la força de la gravetat. Necessitava incorporar una capa permeable que l'aïllés de l'exterior. Així l'aigua podria sortir, però la resina no.

Amb aquestes dades vaig elaborar un esborrany del que hauria de ser el meu prototip descalcificador:



Esquema 1 - Primer prototip

A la part superior, la perspectiva externa del suport:

Vermell: Tub

Blau: Aixeta

A la part inferior, una secció del suport:

Gris: Tub

Groc: Capa permeable

Vermell: Reixeta

Taronja: Resina

3.2.3 Construcció 1

La construcció de l'aparell no va presentar excessius problemes. De fet, disposava de gran diversitat i quantitat de material acumulat durant projectes anteriors.

➤ *Materials*

1. Tub de PVC de 50mm .
2. Unió de 50mm.
3. Filtre de cafetera.
4. Reixeta de metall.
5. Reducció de tub de 50mm a tub de 32mm.
6. Transició de tub de 32mm a rosca mascle de $\frac{3}{4}$ ".
7. Tap de $\frac{3}{4}$ ".

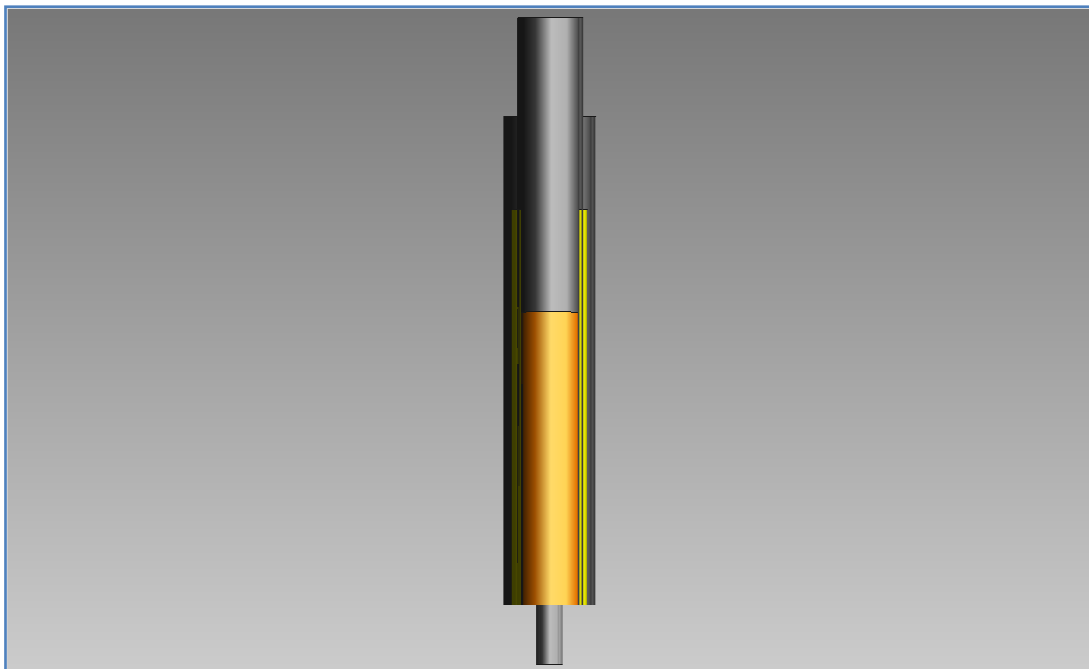
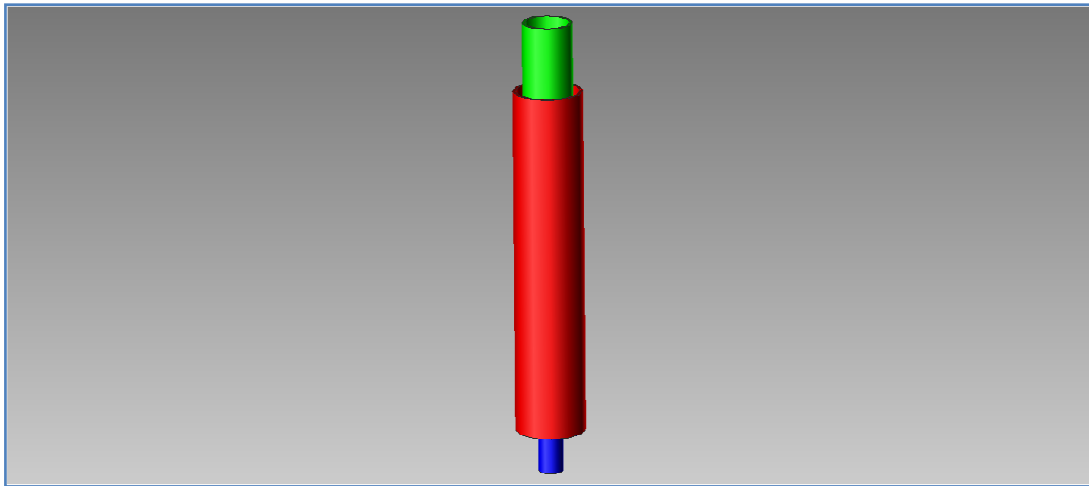
➤ *Procediment*

1. Tallar uns 25cm del tub de PVC
2. Empalmar la transició amb la reducció utilitzant pegament per a plàstic.
3. Empalmar la part anterior amb la unió de 50mm. Per tal d'omplir l'espai buit entre els dos components, omplir amb plàstic i segellar amb cola.
4. Empalmar el tub de 50mm la resta.
5. Tallar la reixeta i el paper de filtre en forma circular amb un diàmetre de 50mm.
6. Introduir-los (primer la reixeta i després el filtre).

3.2.4 Revisió

Després de la seva construcció es va observar un inconvenient en el seu ús: esporàdicament, quan hi havia un moviment brusc, el paper de filtre es desplaçava, produint grans pèrdues de resina impossibles d'evitar.

Per consegüent, es feia necessari trobar alguna forma d'aïllar millor la resina de l'exterior. Inspirant-me en projectes [anteriors](#), vaig concebre un altre tub extraïble introduït dintre del suport inicial: aquest tub tindria un recobriment de tela fortament ajustat a la part inferior, pel que seria virtualment impossible que la resina marxés.



Esquema 2 – Segon prototip

A la part superior, la perspectiva externa del suport:

Verd: Tub extraïble

Vermell: Tub inicial

Blau: Aixeta

A la part inferior, una secció del suport:

Gris: Tub

Groc: Teixit permeable

Taronja: Resina

3.2.5 Construcció 2

➤ Materials

1. Tub de PVC de 50mm .
2. Tub de 32mm.
3. Unió de 50mm.
4. Reducció de tub de 50mm a tub de 32mm
5. Transició de tub de 32mm a rosca mascle de $\frac{3}{4}$ ".
6. Tap de $\frac{3}{4}$ ".
7. Tela sintètica permeable.
8. Gomes elàstiques o similars.
9. Tap de $\frac{3}{4}$ ".

➤ Procediment

1. Repetir els passos 1-4 del procediment anterior.
2. Tallar 30cm del tub de 32mm.
3. Recobrir la part inferior amb la tela.
4. Lligar fortament la tela al tub amb goma elàstica.

3.2.6 Revisió 2

Una vegada construït el nou descalcificador, calia comprovar que la seva construcció era correcta.

Després de fer-ne un ús continuat, no es va detectar cap fuga d'aigua o resina. Així doncs, podia passar a la fase científica.



Vídeo 1 - Construcció del descalcificador amb resines

3.3 Fase científica

Una vegada construït el suport per les resines, calia iniciar la fase científica del projecte; això és, buscar les relacions entre certs paràmetres de l'aigua i les resines per poder conèixer com extreure'n el màxim profit.

3.3.1 Metodologia

➤ *Manipulació dels paràmetres del descalcificador*

Per tal de corroborar o refutar les meves hipòtesis, havia d'alterar de forma ordenada els diferents paràmetres que afecten la duresa de l'aigua. Si els estudiava així, podria saber quin impacte tenia cadascun.

Corba d'evolució del rendiment de la resina amb el seu ús

Per saber la capacitat real de la resina després d'haver tractat un cert volum d'aigua, hauria de realitzar anàlisis periòdiques a l'aigua sortint: la seva duresa mostraria l'efectivitat actual de la resina i conseqüentment, la certesa de les meves hipòtesis.

Quantitat òptima de resina per tractar certa quantitat d'aigua

Hauria de provar diferents volums de resina totalment no saturada amb una quantitat d'aigua concreta; comprovar el nivell de duresa, repetir l'experiment amb diversos volums d'aigua i extrapolar-ho. Ja que també estudiava l'evolució de la resina amb l'ús, els valors de duresa dels primers volums d'aigua tractada per la resina (és a dir, en els que aquesta encara no ha intercanviat cap ió) també servirien per a aquesta part del projecte.

Qualitat de l'aigua resultant

A fi d'establir la qualitat de l'aigua només hauria de comparar els valors de sodi i pH finals amb els inicials.

Diferències entre resines domèstiques i industrials

Per comparar les 2 resines hauria d'estudiar-ne els 2 tipus: domèstiques i industrials.

Qualitat de la resina

No podia alterar la qualitat de la resina, però amb la resta de dades podria deduir quina resina era millor.

➤ *Factors a considerar*

El meus experiments depenien de diversos factors:

Duresa inicial de l'aigua

L'aigua a tractar seria l'aigua corrent, pel que havia de determinar la seva duresa utilitzant el procediment esmentat al pròxim [apartat](#).

De manera que, amb la intenció de comprovar els meus resultats, vaig sol·licitar una còpia de les anàlisis efectuades a l'aigua corrent per **Aigües de Reus empresa municipal S.A.** Així mateix, vaig acurar els resultats obtinguts amb els valors de la web de Consorci d'aigües de Tarragona⁶.

Els valors de l'anàlisi oficial indicaven una duresa de 38-40Hfº. Vaig realitzar unes quantes proves de duresa amb aigua de l'aixeta per veure si els resultats coincidien: les meves anàlisis la situaven entorn a 40Hfº. Això confirmava els meus resultats i procediments com a correctes.

Per tal d'evitar errors en l'experiment, realitzaria anàlisis de duresa d'aigua estàndard abans i després de cada sessió de pràctica per assegurar que el valor és constant: en cas contrari utilitzaria la mitjana aritmètica entre els dos valors com a duresa de referència. Nogensmenys, durant quasi totes les proves el valor es va mantenir en 40ºHf

Volum d'aigua

Els volums de l'aigua a tractar s'anirien afegint amb una proveta de 500ml.

Quantitat de resina

Pesaria la resina abans d'introduir-la al descalcificador.

Tipus de resina

Vaig poder aconseguir 2 tipus diferents de resina, corresponents a una d'ús industrial i una altra de domèstic:

Resina domèstica: Ecowater (proveïdor de ATH)

- Regeneració: Clorur de sodi.
- Forma iònica: Na⁺

Resina industrial Picopure 650 (utilitzada a BASF)

- Resina d'àcid fort.
- Composició
 - Matriu
 - Estirè i 10% DVB
 - Grup funcional: Àcid sulfònic
 - Forma iònica: H⁺
- Regeneració: Àcid clorhídric o sulfúric

⁶ <http://www.ccaait.com/>

Nivell de sodi i pH

La resina domèstica expulsa ions sodi durant en el intercanvi iònic; la industrial, protons. A partir l'EDTA utilitzat també es poden obtenir els nous nivells de sodi i pH (de manera [indirecta](#)) i determinar si l'aigua és apta pel consum

➤ **Intervals utilitzats**

Després d'unes proves preliminars, vaig determinar que les anàlisis es durien a terme:

- Amb increments de 10g de resina en cada experiència: 10g, 20g, 40g i 50g per la domèstica i 10g, 20g i 30g per la industrial. Posteriorment afegiria dues experiències més: 30g de resina domèstica i 50g d'industrial, per tal verificar les hipòtesis establertes després de l'anàlisi de les primeres quantitats.
- Anàlisis cada litre i, posteriorment, quan la resina perdés efectivitat, cada 0.5l.

En certs casos es va fer un anàlisi als 2 o 2.5l a causa de la no variació del rendiment de la resina.

➤ **Anàlisi de la duresa**

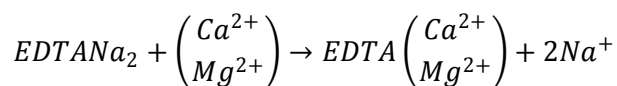
Per mesurar la [duresa](#) de l'aigua vaig fer servir una valoració complexomètrica amb EDTA.

Principi teòric

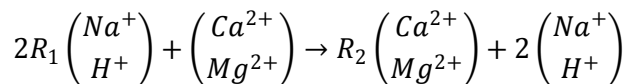
El negre d'eriocrom T és una substància indicadora que en associar-se amb ions metàl·lics canvia el seu color, donant a la solució un to de vi rosat.

La salt disòdica d'àcid etilendiaminotetraacètic (EDTA) forma complexes més estables amb els ions metàl·lics. És per això, que a l'afegir-ne a la dissolució, aquests es dissocien del negre d'eriocrom T i s'uneixen a l'EDTA. Això provoca un altre canvi en el color en la solució, que es torna d'un blau clar intens. La formació de complexes de l'EDTA amb ions metàl·lics és mol a mol. A més, sota certes condicions de pH es pot regular la seva selectivitat vers certs elements.

La reacció que té lloc entre l'EDTA i els ions de calci i magnesi és la següent:



Gràcies a aquest fet, podré determinar la duresa de les mostres d'aigua, així com el increment de sodi o de duresa. Durant el intercanvi iònic a la resina, segons si el seu grup iònic té sodi o hidrogen, es produeix la següent reacció entre els contra-ions de la resina i el calci i el magnesi:



Per tant, si calculo la duresa extreta, podré deduir el sodi/hidrogen aportat.

Reactius

- Solució EDTA 0.01M
- Complexona de magnesi
- Dissolució esmorteïdora de pH 10 (tampó)
- Negre d'eriocrom T

Materials

- Matràs de Erlenmeyer de 100ml
- Vas de precipitats de 100ml
- Pipeta aforada de 10ml
- Pipeta d'1ml
- Bureta i suport (també es pot emprar la pipeta de 1ml per valorar)
- 2 tubs d'assaig (per poder comparar els colors de la valoració amb els d'un assaig previ)
- Embut
- Xuclador

Procediment

Preparació de les solucions

Solució tampó

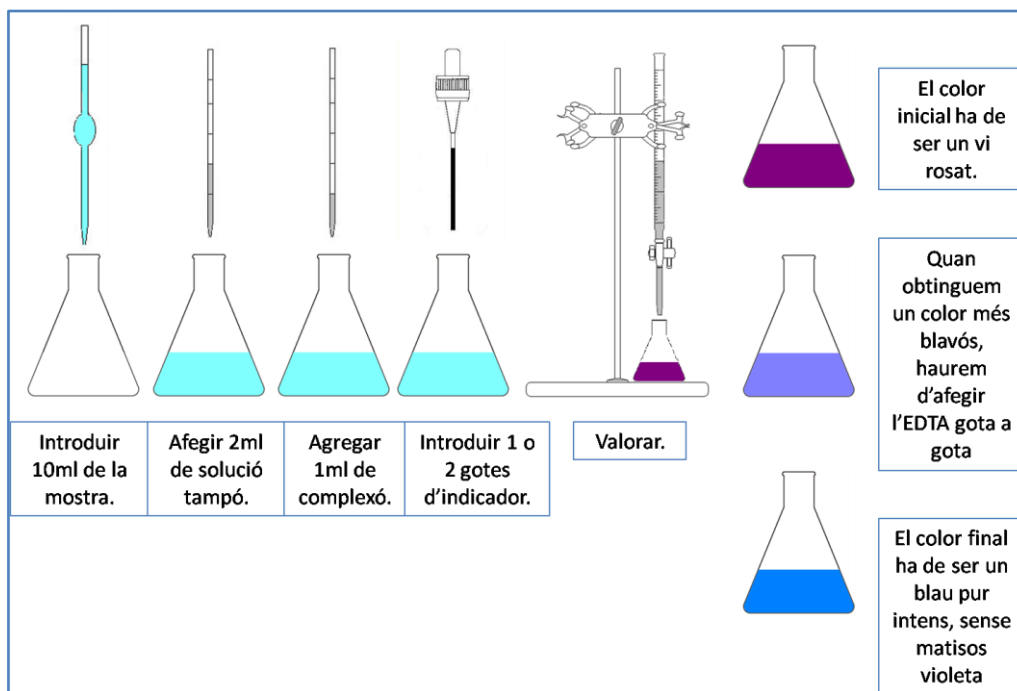
Dissoldre 67.5g NH_4Cl en 570ml NH_3 concentrat i aforar a 1l.

Negre d'eriocrom T

Dissoldre 0.15g de negre sòlid en 25ml d'etanol.

Valoració/Titulació

1. Afegir al matràs de Erlenmeyer 10ml de la mostra amb la pipeta i el xuclador.
2. Agregar al matràs 0.2ml de solució tampó de pH 10 i homogeneïtzar la solució.
3. Afegir 0.1ml de complexona de magnesi.
4. Introduir 1 gota de negre d'eriocrom T i moure el matràs fins obtenir un color vi rosat homogeni.
5. Procedir a valorar amb EDTA
6. Cal titular fins observar un canvi cap a un color blau pur.
7. A les últimes fases de la valoració, la mostra adquireix un to lila; en aquest punt és convenient un interval de temps d'uns 2 o 4 segons entre gota i gota.
 - Les primeres vegades em va resultar útil comparar el color amb el d'una valoració prèvia (que prèviament havia introduït als tubs d'assaig). Una vegada l'ull s'ha acostumat al canvi de color ja no cal.
8. Repetir un mínim de 2 vegades per evitar errors i precisar la mesura fent una mitjana.



Il·lustració 4 - Esquema de la valoració



Vídeo 2 - Anàlisi de la duresa

➤ Càlculs

Duresa

Una vegada vaig finalitzar la valoració, vaig emprar factors de conversió per establir la duresa:

$$\frac{X \text{ ml sol. EDTANa}_2}{10 \text{ ml mostra}} \cdot \frac{10^3 \text{ ml mostra}}{1 \text{ l mostra}} \cdot \frac{1 \text{ l sol. EDTA}}{10^3 \text{ ml sol. EDTA}} \cdot \frac{0.01 \text{ mols EDTANa}_2}{1 \text{ l sol. EDTA}} \cdot \frac{1 \text{ mol Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}}{1 \text{ mol EDTANa}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}} \cdot \frac{100.09 \text{ g CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} \cdot \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \cdot \frac{^\circ \text{Hf}}{\frac{10 \text{ mg}}{\text{l mostra}}} = 10x^\circ \text{Hf}$$

Per tant, faré servir l'expressió **Duresa = 10x[°]Hf**; on **X** són els ml d'EDTA que he fet servir a la valoració.

$$\frac{X \text{ ml sol. EDTANa}_2}{10 \text{ ml mostra}} \cdot \frac{10^3 \text{ ml mostra}}{1 \text{ l mostra}} \cdot \frac{1 \text{ l sol. EDTA}}{10^3 \text{ ml sol. EDTA}} \cdot \frac{0.01 \text{ mols EDTANa}_2}{1 \text{ l sol. EDTA}} \cdot \frac{1 \text{ mol Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}}{1 \text{ mol EDTANa}_2} \cdot \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{1 \text{ mol Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}} \cdot \frac{100.09 \text{ g CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} \cdot \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 100x \text{ mg CaCO}_3/\text{l mostra}$$

És a dir, utilitzaré l'expressió **Duresa = 100xmgCaCO₃/l_{mostra}** on **X** són els ml d'EDTA que he fet servir en la valoració.

La duresa l'he expressada majoritàriament en mgCaCO₃ i a les conclusions finals, en graus francesos, més usuals en àmbit domèstic.

Una alternativa

També es podria haver utilitzat un altre procediment per mesurar la duresa: la variació de conductivitat.

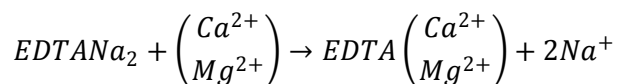
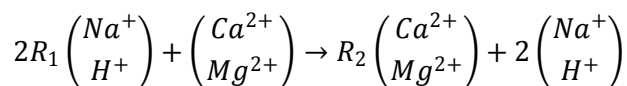
Malauradament aquesta alternativa no serveix per les resines domèstiques ja que intercanvien un altre catió: el sodi.

En resines amb el grup iònic H⁺, en canvi, sí que es podria haver arribat a considerar aquesta alternativa, ja que l'increment del ió hidrogen només comporta un augment de l'acidesa.

Per la seva major complexitat (ja que altres factors podrien alterar la conductivitat de l'aigua) es va utilitzar el procediment químic.

Nivell de sodi

A partir de la duresa eliminada es pot calcular el increment de sodi de manera indirecta. Si sabem que:



Llavors

$$\begin{aligned} & \frac{(4 - X) \text{ ml sol.}_{EDTA}}{10 \text{ ml mostra}} \cdot \frac{10^3 \text{ ml mostra}}{1 \text{ l mostra}} \cdot \frac{1 \text{ l sol.}_{EDTA}}{10^3 \text{ ml sol.}_{EDTA}} \cdot \frac{0.01 \text{ mols EDTANa}_2}{1 \text{ l sol.}_{EDTA}} \\ & \cdot \frac{1 \text{ mol}_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}}{1 \text{ mol}_{EDTANa_2}} \cdot \frac{2 \text{ mol}_{Na^+}}{1 \text{ mol}_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}} \cdot \frac{23 \text{ g Na}^+}{1 \text{ mol}_{Na^+}} \cdot \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \\ & = (184 - 46x) \text{ mg Na}^+ / \text{L} \end{aligned}$$

El valor de 4ml d'EDTA correspon a la duresa total (40°Hf), per tant, a l'efectuar la diferència calculo la duresa eliminada.

Només cal afegir el sodi inicial⁷ per tenir l'expressió de la concentració de sodi, on **X** són els ml d'EDTA utilitzats en la valoració.

$$[Na^+] = (130 + 232 - 46X) \frac{\text{mg Na}^+}{\text{l}} = (362 - 46X) \frac{\text{mg Na}^+}{\text{l}}$$

⁷ El sodi es mesura mitjançant una fotometria de flama, o bé fent balanç entre els anions i cations finals. A causa de la complexitat d'aquests procediments, va resultar més senzill fer servir els valors proporcionats per **Aigües de Reus empresa municipal S.A.**

pH

He utilitzat el mateix procediment que abans, considerant que el pH és el logaritme invers de la concentració [molar](#):

$$\Delta[H^+] = \frac{(4 - X)ml \text{ sol.}_{EDTA}}{10ml \text{ mostra}} \cdot \frac{10^3 ml \text{ mostra}}{1l \text{ mostra}} \cdot \frac{1l \text{ sol.}_{EDTA}}{10^3 ml \text{ sol.}_{EDTA}} \cdot \frac{0.01 mols \text{ EDTANa}_2}{1l \text{ sol.}_{EDTA}} \\ \cdot \frac{1 mol_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}}{1 mol_{EDTANa_2}} \cdot \frac{2 mol_{H^+}}{1 mol_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}} = (0.008 - 0.002X) mols H^+ / L$$

Finalment trobava la concentració d'hidrogen final, i conseqüentment, el pH final, partint de la concentració d'ions H^+ inicial:

$$pH = -\log(10^{-7.88} + 0.008 - 0.002x)$$

Aquests càlculs també es podrien dur a terme calculant la duresa extreta i sumant el sodi/hidrogen corresponent amb factors de conversió.

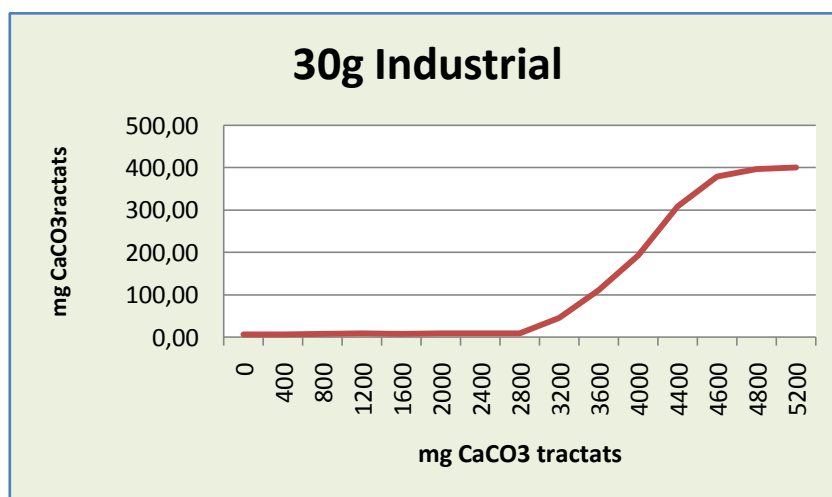
Tot i així, la primera manera resulta més immediata, una vegada s'ha arribat a la fórmula, que no pas la segona, ja que no cal fer cap càlcul previ (duresa extreta), només aplicar una fórmula.

3.3.2 Resultats

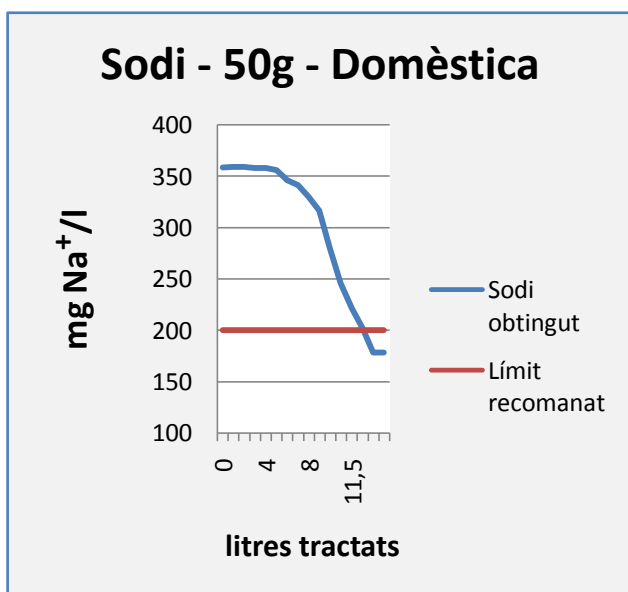
Vaig més de 400 anàlisis amb les diferents combinacions de tipus i massa de resina i volum d'aigua. Les taules recullen la duresa de l'aigua, el nivell de sodi i el pH al llarg del cicle d'ús dels diferents tipus i quantitats de resina.

La versió informàtica dels resultats inclou indicadors que permeten visualitzar millor el nivell de duresa, sodi i pH, s'hi pot accedir pel CD del treball.

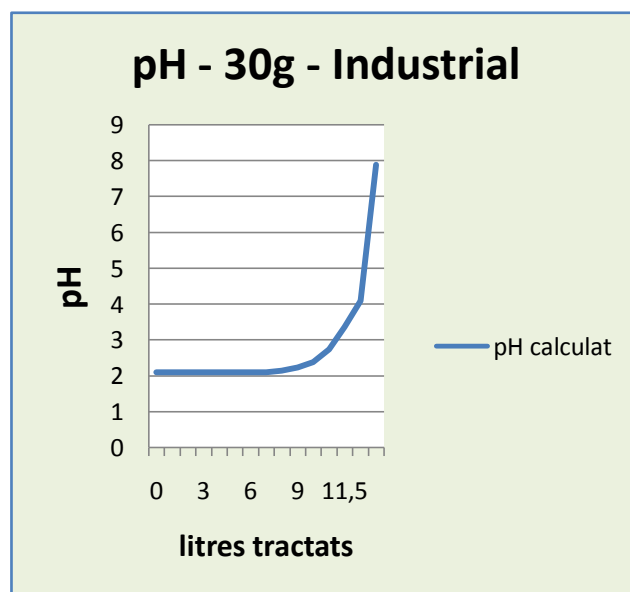
Per la seva extensió, els resultats es recullen als [annexos](#). Aquí només en mostraré una petita part per tenir una perspectiva general.



Gràfic 1 - Evolució de la duresa amb 30g de resina industrial



Gràfic 2 - Evolució del nivell de sodi amb 50g de resina domèstica



Gràfic 3 - Evolució del pH amb 30g de resina industrial

3.3.3 Tractament matemàtic

Els resultats per sí mateixos no mostren res, cal interpretar-los. Abans d'arribar a les conclusions, però, vaig voler donar un tractament matemàtic als resultats: volia estandarditzar-los i tractar de crear un model matemàtic el més universal possible que reproduís la seva evolució. Per tant, em vaig proposar com a objectiu final **trobar una única funció per a cada tipus de resina**.

Amb aquest objectiu, inicialment vaig fer servir el programa *CurveExpert 1.3*: amb aquesta aplicació gratuïta es pot trobar la funció aproximada que descriuen els diferents paràmetres de les resines (duresa/sodi/pH) amb l'aigua utilitzada.

Posteriorment, em vaig trobar amb certes limitacions pel que vaig recórrer a una versió de prova de *FindGraph 1.960*. [Veure el document](#).

➤ Variables

Duresa amb el temps

Per estudiar aquest factor adequadament cal considerar les següents variables

❖ *Tipus de resina*

Hauria de calcular una funció per a els dos tipus de resina

❖ *Duresa de l'aigua*

Aquest assumpte em va comportar moltes complicacions i problemes:

Si hagués fet l'anàlisi matemàtica utilitzant els litres d'aigua afegits, aquesta funció només seria aplicable a l'aigua de duresa 40°Hf, el que li restaria versatilitat. Vaig acabar optant per canviar el volum d'aigua tractada pels mgCaCO₃ que havien passat per la resina. D'aquesta manera pensava que podria utilitzar la funció amb qualsevol duresa: només caldria aplicar un factor de conversió per passar de volum a duresa i de duresa a volum. És a dir:

$$X \text{mgCaCO}_{3\text{tractats}} \cdot \frac{1 \text{l aigua inicial}}{Z \text{mgCaCO}_3} = \text{Volum d'aigua tractat}$$

Sent *X* els mg de carbonat de calci per litre de l'aigua tractada per la resina i *Z* els inicials per litre d'aigua.

Mes encara existia un altre problema: la corba d'aquesta funció tindria dues asímptotes: una a 0 (quan s'extreu tota la duresa) i l'altra a 400 (quan la resina està saturada). Quan la duresa de l'aigua canviés, també ho faria l'asímtota horitzontal superior (una aigua de 150mg mai podrà tenir-ne 400).

Per aquest motiu, caldria interpretar els resultats obtinguts: si la duresa inicial fos menor a 40°Hf, els resultats que sobrepassessin la duresa inicial equivalen a la duresa inicial; si la duresa inicial fos major, els resultats majors de 40°Hf (quan la resina està totalment saturada), equivaldrien a la duresa inicial.

Malaauradament, després de realitzar el tractament matemàtic vaig arribar a una nova conclusió que refutava els raonaments anteriors: utilitzant els mg de carbonat de calci que havien passat pel descalcificador no podria extrapolar els resultats a qualsevol duresa perquè aquest procediment no té en compte la velocitat amb què aquest carbonat de calci pel descalcificador: és a dir, una aigua més dura aporta més duresa, però també és cert que la resina que tracta l'aigua es trobarà de amb més ions per unitat de temps, fet que afectarà el seu rendiment.

Només vaig arribar a aquesta conclusió després de realitzar la discussió del model matemàtic, quan vaig haver de fer servir aigua més tova. A causa de l'enorme quantitat de temps invertit en aquest aspecte, vaig decidir continuar utilitzant els mg de carbonat de calci que havien passat per descalcificador com una variant, i no els litres d'aigua.

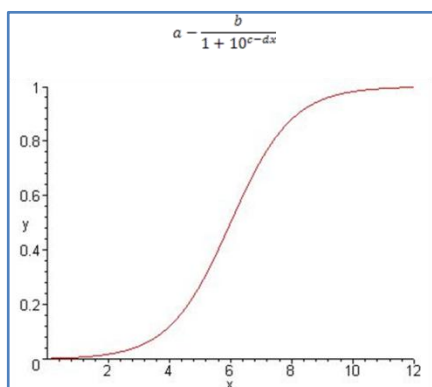
Una nota final: amb tot i això, el procediment de realitzar un factor de conversió no és totalment imprecís: si l'usuari fa servir el model proposat en una aigua diferent a 40^oHf, tindrà uns resultats que, tot i no ser del tot correctes, si poden servir com unes primeres xifres orientatives, amb una funció semblant però desplaçada en l'espai (cap a l'esquerra si l'aigua és més tova i cap a l'esquerra si és més dura). Sols cal tenir més precaució.

Sodi/pH amb el temps

Vaig considerar que sabent la duresa final amb les funcions que es trobaran a continuació, l'usuari ja podria calcular el sodi o pH conseqüents utilitzant com a base els càlculs ja [detallats](#).

A més, com ja he dit, calcular la funció de la duresa ja resulta per sí mateix un procediment complicat, pel que preferia centrar-me només en la duresa.

➤ *Funció logística*



Gràfic 4 - Funció logística

Després d'observar els diferents models que el programa m'oferia per reproduir l'evolució de la resina, em vaig decidir per una funció logística: aquesta funció era precisa (coeficients de correlació propers a 1) i s'apropava conceptualment al seu comportament.

La funció logística s'utilitza en fenòmens en què un creixement exponencial (en aquest cas, la progressiva saturació de la resina), s'acaba detenint (completa saturació), se sol utilitzar en l'economia i el creixement

poblacional. La funció logística és⁸:
$$a - \frac{b}{1+10^{c-dx}}$$

Els paràmetres a; b; c; d; són els que tractaré de determinar amb el tractament matemàtic.

⁸ <http://patoral.umayor.cl/anestbas/rl01.jpg>

Eines informàtiques de tractament matemàtic

Curve Expert 1.3

Curve Expert 1.3 és un programa molt senzill d'utilitzar. Es pot descarregar gratuïtament des de la pàgina web oficial (<http://curveexpert.webhop.net/>).

Una vegada haguem obert el programa, només hem d'introduir les variables a la taula. A la vegada que introduïm les dades, veurem el gràfic corresponent.

Finalment, podrem obtindre diverses funcions (més o menys aproximades) fent clic a *Run CurveFinder*. De totes les funcions calculades tan sols hem d'escollir la que més s'adapti a les nostres necessitats.

FindGraph 1.960

FindGraph 1.960 no és un programa gratuït, tot i que té un període de prova de 30 dies amb part de les seves funcions. És un programa molt més ampli i que permet càlculs més complexos, tot i que només el vaig utilitzar superficialment. Per trobar la funció d'una taula de valors només cal introduir les dades al programa i escollir el tipus de funció desitjada (en aquest cas, logística).

Aquest programa també permet el procés invers: representar una determinada funció. Això va permetre representar gràficament les meves prediccions.

➤ Resultats (duresa)

Després de passar els resultats pel programa es van obtenir les següents funcions:

Resina domèstica

Resina (g)	Funció	Coef. Correl
10	$230.7 + \frac{169.3}{1 + 10^{(6.57 - 0.0034x)}}$	0,9889
20	$73.67 + \frac{326.33}{1 + 10^{(3.15 - 0.0022x)}}$	0,9920
40	$20 + \frac{380}{1 + 10^{(7 - 0.0024x)}}$	0,9816
50	$7 + \frac{393}{1 + 10^{(7.14 - 0.0016x)}}$	0,9924

Taula 5 - Funcions que determinen el comportament de la resina domèstica

Estandardització

Com es veu a la imatge [anterior](#), cada funció està composta per 4 paràmetres. Si volia trobar una fórmula per a qualsevol quantitat de resina, havia de trobar una funció que determinés el valor de cada paràmetre en funció de la quantitat d'aquesta: així, uniria les funcions dels 4 paràmetres en una sola, obtenint una funció universal. Vaig passar cada paràmetre de la resina pel programa (sent x, no la duresa, sinó la massa de resina): els resultats van ser satisfactoris: totes les funcions tenien un coeficient de correlació molt proper a 1.

Paràmetre	Funció	Tipus de funció
A	$40.86 - 0.834x + \frac{19816.98}{x^2}$	Capacitat calorífica ⁹
B	$359.13 + 0.834x - \frac{19816.98}{x^2}$	Capacitat calorífica
C	$18.31 - 1.71x + 0.059x^2 - 0.000595x^3$	Regressió
D	$0.00705 - 0.0005156x + 1.4175 \cdot 10^{-5}x^2 - 1.857 \cdot 10^{-5}x^3$	Regressió

Taula 6 - Funcions dels paràmetres de les resines domèstiques

⁹Capacitat calorífica: Energia necessària per augmentar en 1K la temperatura d'un cos.

Per tant, substituint aquestes funcions en la funció inicial:

$$y = 40.86 - 0.834a + \frac{19816.98}{a^2} + \frac{359.13 + 0.834a - \frac{19816.98}{a^2}}{1 + 10^{18.31 - 1.71a + 0.059a^2 - 0.000595a^3 - x(0.00705 - 0.0005156a + 1.4175 \cdot 10^{-5}a^2 - 1.857 \cdot 10^{-5}a^3)}}$$

On:

y: mg de CaCO₃ per litre en l'aigua

x: mg de CaCO₃ passats per la resina

a: quantitat de resina (en grams)

Industrial

Resina (g)	Funció	Coef. Correl
10	$114.7 + \frac{285.3}{1 + 10^{(4.23 - 0.0022x)}}$	0,9950
20	$24.67 + \frac{372}{1 + 10^{(6.56 - 0.0024x)}}$	0,9846
30	$8.33 + \frac{391}{1 + 10^{(12.08 - 0.0031x)}}$	0,9949

Taula 7 - Funcions que determinen el comportament de la resina industrial

Estandardització

Paràmetre	Funció	Tipus de funció
A	$6.29 - 0.0407x + \frac{12058.36}{x^2}$	Capacitat calorífica
B	$392.47 - 0.36x - \frac{11078.18}{x^2}$	Capacitat calorífica
C	$7.25 - 0.625x + \frac{522.99}{x^2}$	Capacitat calorífica
D	$0.000769 + 7.58 \cdot 10^{-5}x + \frac{0.0648}{x^2}$	Capacitat calorífica

Taula 8 - Funcions dels paràmetres de les resines industrials

Amb tot això puc expressar que:

$$y = 6.29 - 0.0407a + \frac{12058.36}{a^2} + \frac{392.47 - 0.36a - \frac{11078.18}{a^2}}{1 + 10^{7.25 - 0.625a + \frac{522.99}{a^2} - x(0.000769 + 7.58 \cdot 10^{-5}a + \frac{0.0648}{a^2})}}$$

On:

y: mg de CaCO₃ per litre en l'aigua

x: mg de CaCO₃ passats per la resina

a: grams de resina

La realització d'aquest model matemàtic em va permetre realitzar una interpretació més profunda dels resultats. Per veure una comparativa model matemàtic – resultats, es poden consultar els [annexos](#).

Però encara hauria de verificar l'exactitud d'aquest model matemàtic, a l'apartat de [discussió](#).

3.3.4 Interpretació

La funció logística es pot dividir en tres fases, una inicial de latència, una de creixement exponencial i, finalment, una d'estancament. Aquest creixement exponencial és menor a les resines domèstiques.

Això significa que una vegada s'arriba a un punt d'inflexió, la resina perd efectivitat ràpidament. A les domèstiques, aquesta pèrdua és menys radical.

El coeficient de correlació s'allunya de 1 a mesura que la quantitat de resina disminueix. Això es fa més patent a les resines domèstiques, que tenen un coeficient global 0.01 menor.

Aquest fet té una explicació: la corba de duresa de l'aigua tractada per la resina domèstica és més estable: el creixement no és tan exponencial, per tant, és lògic que s'allunyi del model logístic.

Igualment, la resina domèstica és més densa i ocupa un menor espai en el descalcificador. Per aquest motiu, variacions puntuals de les condicions de la resina en certes regions (més o menys saturades) així com la mateixa aplicació de l'aigua (que sempre desplaça mínimament la resina) creen canvis en la duresa final que, a causa de la poca quantitat de resina, tenen una alta influència.

En quantitats de resina més elevades, això no succeeix: aquestes petites variacions circumstancials es veuen compensades pel volum de resina restant, que en minimitza l'efecte.

Per tant: l'efectivitat de les resines varia quan s'utilitzen en petites quantitats. En volums no molt petits de resina, en canvi, el seu comportament és més previsible.

3.3.5 Discussió

Per verificar el model matemàtic proposat vaig fer 2 comprovacions:

➤ *Contrastar els resultats teòrics amb els pràctics*

Vaig calcular el tant per cent d'error entre les mesures fetes a la part experimental i la duresa teòrica del model matemàtic. Per fer-ho vaig operar:

$$\frac{|Duresa pràctica - Duresa teòrica|}{Duresa teòrica} \cdot 100$$

Vaig obtenir que la mitjana d'error era del 12.55%. Com és evident, però, no totes les resines tenen la mateixa fiabilitat, i no tots els trams són igual de fidels al model matemàtic (la fase de creixement exponencial és la més problemàtica).

➤ *Extrapolar i predir el comportament de la resina*

La manera definitiva d'assegurar la consistència del model matemàtic era observar si era capaç de predir el comportament d'altres quantitats de resines.

Els resultats van ser satisfactoris, a mitges:

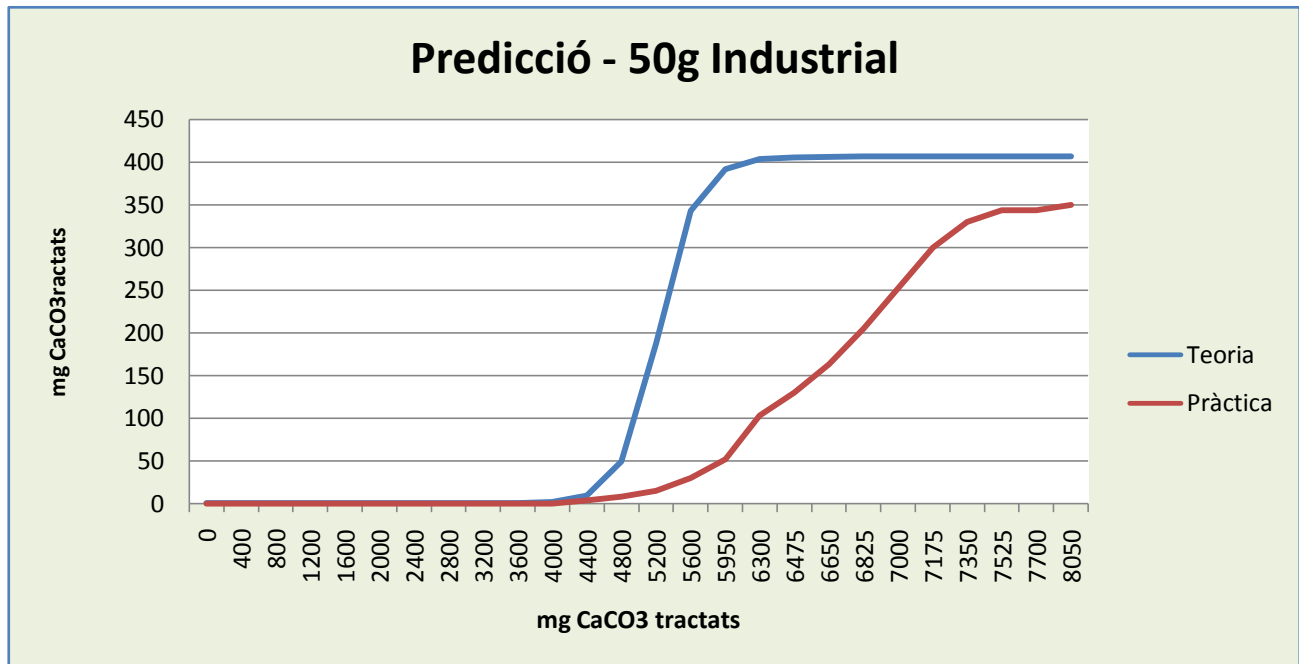
- El model de la resina industrial no va ser prou exacte: la corba descrita a la realitat no tenia el creixement exponencial tan marcat com la teòrica, ni començava tan aviat.
- D'altra banda, la funció teòrica i la pràctica de la resina de 30g domèstica sí que era prou aproximada.

Podria semblar que el tractament matemàtic està equivocat en un 50%, però no és així: durant la realització de les valoracions vaig detectar un fet inusual, la duresa inicial havia baixat fins a 35-36Hf, un 10% menys del normal. No podia augmentar la duresa de l'aigua, pel que vaig haver de fer les proves amb aquesta nova duresa.

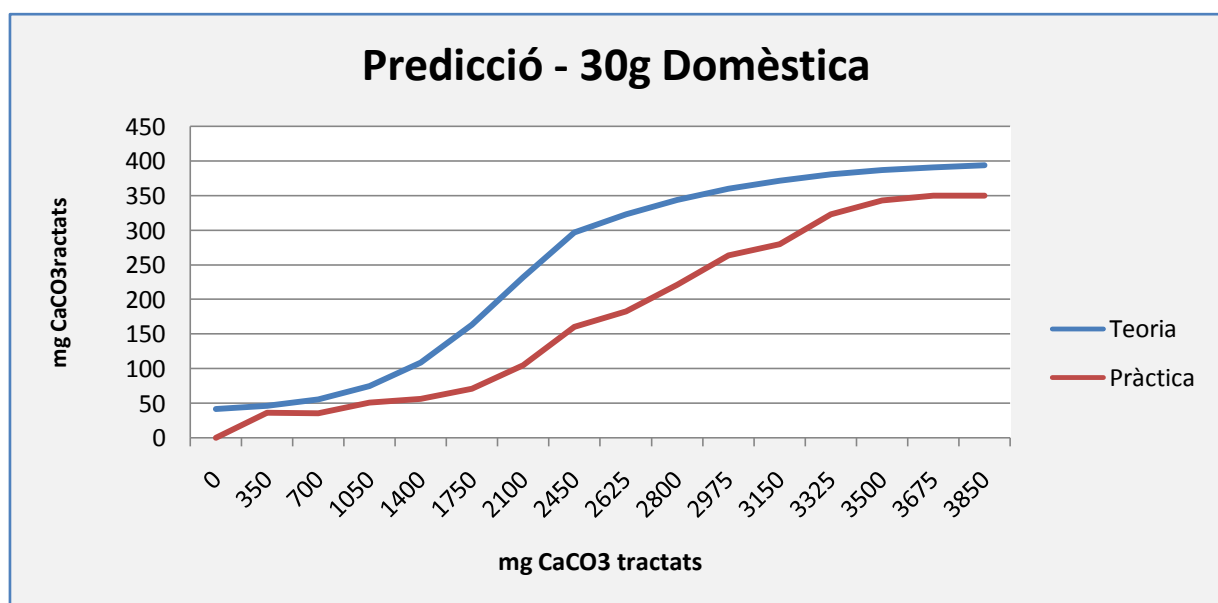
Aquest fet provoca que la funció utilitzada no sigui la ideada per la duresa inicial utilitzada. Tenint això en consideració, es pot concloure que el model ha respòs favorablement a unes circumstàncies adverses (sobretot la resina domèstica de 30g). Estic segur, tot i no poder demostrar-ho, que unes noves analítiques amb la duresa inicial adient s'ajustarien més al model calculat.

També podria haver intentat trobar una funció que també s'ajustés a les diferents composicions de l'aigua. Ara bé, això hauria suposat una enorme quantitat d'anàlisis i temps (cada quantitat de resina són unes 45 anàlisis, per un mínim de 4-5 quantitats de resina mesures serien 180, per un mínim de 5 dureses inicials farien 900 anàlisis de resina domèstica i 900 d'industrial: **1800** anàlisis totals), així com una major complexitat matemàtica. Tanta profunditat s'escapava de l'objectiu del meu treball.

En resum: el model es mostra prou satisfactori: es possible que no sigui del tot exacte, però compleix sobradament els requisits per sustentar les meves conclusions, d'un caràcter molt més qualitatiu que no pas quantitatiu: així per exemple, el comportament logístic de la funció és un fet evident i sòlid, tot i tenir matisos a la seva anàlisi matemàtica al detall.



Gràfic 5 - Comparativa prediccions - pràctica de 50g de resina industrial



Gràfic 6 - Comparativa prediccions - pràctica de 30g de resina domèstica

4. Conclusions

En aquest treball he estudiat les resines d'intercanvi iònic, he realitzat valoracions complexomètriques de la duresa de l'aigua amb EDTA al llarg del cicle d'ús de la resina per tal d'establir un model matemàtic del seu comportament i he determinat un conjunt de paràmetres per fer un ús més eficient del producte.

Després de realitzar les proves de la duresa i aplicar-les-hi el tractament matemàtic, vaig arribar a les següents conclusions.

La meua primera hipòtesi es va constatar com a incorrecta: tal i com es pot observar a l'apartat de tractament [matemàtic](#), la funció que determina la duresa que he calculat correspon a una **funció logística**:

Funció de la resina domèstica amb aigua de duresa 40°Hf

$$y = 40.86 - 0.834a + \frac{19816.98}{a^2} + \frac{359.13 - 0.834a - \frac{19816.98}{a^2}}{1 + 10^{18.31 - 1.71a + 0.059a^2 - 0.000595a^3 - x(0.00705 - 0.0005156a + 1.4175 \cdot 10^{-5}a^2 - 1.857 \cdot 10^{-5}a^3)}}$$

Funció de la resina industrial amb aigua de duresa 40°Hf

$$y = 6.29 - 0.0407a + \frac{12058.36}{a^2} + \frac{392.47 - 0.36a - \frac{11078.18}{a^2}}{1 + 10^{7.25 - 0.625a + \frac{522.99}{a^2} - x(0.000769 + 7.58 \cdot 10^{-5}a + \frac{0.0648}{a^2})}}$$

On:

y: mg de CaCO₃ per litre en l'aigua

x: mg de CaCO₃ passats per la resina

a: quantitat de resina (en grams)

- La variació de la duresa final de l'aigua no correspon a una funció lineal, per tant, la resina no se satura uniformement. La variació de la duresa s'ajusta a una funció logística.

Ara bé, quina explicació té això? Per entendre-ho millor he dividit el cicle de funcionament de la resina en 3 parts.

Primer, la duresa experimenta una **fase de latència**: quan l'aigua baixa a través del descalcificador, es troba inicialment amb les primeres capes de resina. Aquestes capes superiors eliminen quasi tota la duresa de l'aigua, començant a esgotar-se durant el procés. Quan l'aigua baixa per les següents capes de resina, es troba molt tova, pel que la resina inferior no se satura.

Durant aquesta latència arriba un punt en el qual les capes superiors es van saturant del tot. Durant certa quantitat d'aigua (major a més quantitat de resina) la resta de resina pot eliminar tota la duresa de l'aigua. Tanmateix, aquesta resina ha de tractar més duresa que abans, pel que és lògic que se saturi ràpidament.

Això ens porta a una **fase de creixement exponencial**: com que la resina no saturada que encara queda, se satura ràpidament, la duresa experimenta un enorme creixement en poca quantitat d'aigua tractada.

Finalment s'acaba saturant tota la resina, pel que ja no s'elimina duresa. Aquesta és l'anomenada **fase d'estancament**, on la duresa roman en el seu valor màxim.

Aquesta conclusió, però, té un problema.

- El model logístic no s'ajusta tant a petites quantitats de resina.

Això també té una explicació: en petites quantitats de resina, les capes superiors no poden eliminar tota la duresa, pel que tota la resina se satura ràpidament. A més, petites variacions en les condicions d'una part de la resina (més o menys saturada, zones sense tant contacte amb l'aigua, etc.) tenen un major impacte a la duresa final, ja que hi ha menys resina que pugui compensar aquestes anomalies. Això provoca que la funció logística no s'hi ajusti tan bé.

Un altre dels meus objectius era esbrinar la quantitat de duresa que havia de posar a l'aparell per arribar a una duresa idònia.

- Si volia que els primers litres d'aigua tinguessin una duresa ideal pel consum, (22.5^ºHf), havia de fer servir una massa de resina molt petita (menys de 10g).

Però l'ús de resines en petites quantitats suposa dos problemes: el primer, que se saturarà ràpidament; el segon: que es poden produir fugues de duresa puntuals (per anomalies en certes regions de la resina). Aquests fets, en canvi, no succeeixen amb majors quantitats de resina (40g de resina domèstica i 30g d'industrial)

- Per tant, la manera més profitosa de fer servir el descalcificador per obtenir aigua pel consum és utilitzant-lo amb una quantitat de resina no gaire petita; de fer-ho així, per contra, l'aigua serà massa tova, pel que caldrà barrejar l'aigua tractada amb la inicial per tal d'incrementar la duresa fins el punt òptim.

Utilitzant el model matemàtic que he establert anteriorment, l'usuari podrà saber aproximadament quan començarà el creixement exponencial de la duresa i, conseqüentment, quan haurà d'efectuar la regeneració de la resina.

- Si, en canvi, l'usuari simplement vol eliminar tota la duresa possible no tindrà cap problema, no haurà de fer res amb l'aigua tractada. Això sí, haurà de considerar la qualitat de l'aigua resultat.

Quan a la qualitat de l'aigua resultant, les conclusions no van ser les que m'esperava:

- El nivell de sodi màxim assolit durant el tractament és de 310mg, això suposa un 55% més del recomanable pel consum.

Aquest fet té conseqüències en el gust de l'aigua, així com un efecte perjudicial en els electrodomèstics. Fins i tot, pot resultar perjudicial per a persones amb tensió alta.

- Per aquest motiu, considero poc recomanable beure una aigua molt dura tractada per una resina domèstica, ja que pot resultar més perjudicial. A més, existeix la possibilitat que l'augment de sodi sigui prou significatiu perquè ataquí els electrodomèstics o la canonada.

Si es vol descalcificar aigües amb poca duresa, en canvi, aquest fet no hauria d'ésser tan significatiu: al ser menor la duresa eliminada, també ho hauria de ser el increment de sodi. Per tant, es podria arribar a consumir l'aigua tractada.

- El pH pot arribar a disminuir fins a 2, és a dir, 5 unitats més del recomanable.

Això origina una acidesa molt perjudicial pel consum humà, així com desagradable, que té una pitjor l'aparença (l'aigua àcida pot tenir un cert color groguenc) i que pot afectar els electrodomèstics i les canonades.

- Les aigües dures tractades amb resina industrial presenten una acidesa massa elevada com per ser consumides.

Com abans, les aigües toves tractades experimenten un descens menys greu del pH, pel que són més aptes pel consum

Tanmateix, les resines s'utilitzen actualment, pel que aquesta problemàtica està solucionada. ¿Però com s'evita un descens tan notable en la qualitat com el que ha experimentat l'aigua que ha tractat el meu descalcificador? Existeixen diversos mètodes que poden solucionar aquests problemes:

- Barrejar aigües
 - Com a l'apartat [quantitat òptima de resina](#), l'usuari pot optar per barrejar aigües. En aquest cas, no tan sols per incrementar una mica la duresa de l'aigua (no tenir aigua tan tova), sinó per disminuir el nivell de sodi o el pH. Amb això augmenta la qualitat de l'aigua jugant amb l'increment de duresa.
- Barrejar les 2 resines
 - Si s'utilitzen les dues resines conjuntament, trauran la duresa entre les dues. Tot i extreure la mateixa duresa que una sola, l'aigua augmentarà en acidesa i sodi, però no tant en cada paràmetre com si només un tipus de resina tractés l'aigua. Així s'obtenen tots els beneficis del tractament i es minimitzen els inconvenients.
- Utilitzar resines catióniques i aniòniques
 - Aquest mètode és el que s'utilitza a l'actualitat perquè és el més factible i efectiu dels tres: si l'usuari no vol cap tipus de disminució en la qualitat de l'aigua, haurà d'utilitzar tant resina catiónica (que desprengui H^+), com aniònica (que desprengui OH^-). Utilitzant aquest procediment, el H^+ expulsat per la resina catiónica provoca una disminució del pH; però quan l'aigua passa per la resina aniònica aquesta acidificació es compensa: la resina aniònica expulsa OH^- , que es combina amb l' H^+ , formant aigua i augmentant el pH, que es torna a anivellar.

La fase exponencial de les resines domèstiques no és tan accentuada com la de les industrials: això significa que:

- Amb les resines domèstiques és menys probable que l'usuari es trobi amb una fuga de duresa. Amb la resina industrial, en canvi, la saturació és molt més ràpida, pel que, sense un control exhaustiu, ens podem trobar de sobte amb una aigua molt dura.

Aquesta conclusió és conseqüent amb el camp en què es fa servir cadascuna: les resines domèstiques es poden utilitzar pel consum humà, cosa que fa que per motius de seguretat calgui evitar increments de duresa excessivament bruscos. Amb les industrials, en canvi, això no passa; fins i tot és probable que sigui rentable prescindir d'aquesta saturació més progressiva en pro d'una major capacitat de tractament. A més, el sector industrial disposa d'aparells de mesura molt precisos que permeten saber amb gran exactitud quan regenerar la resina, pel que les fugues puntuals tampoc no són un problema.

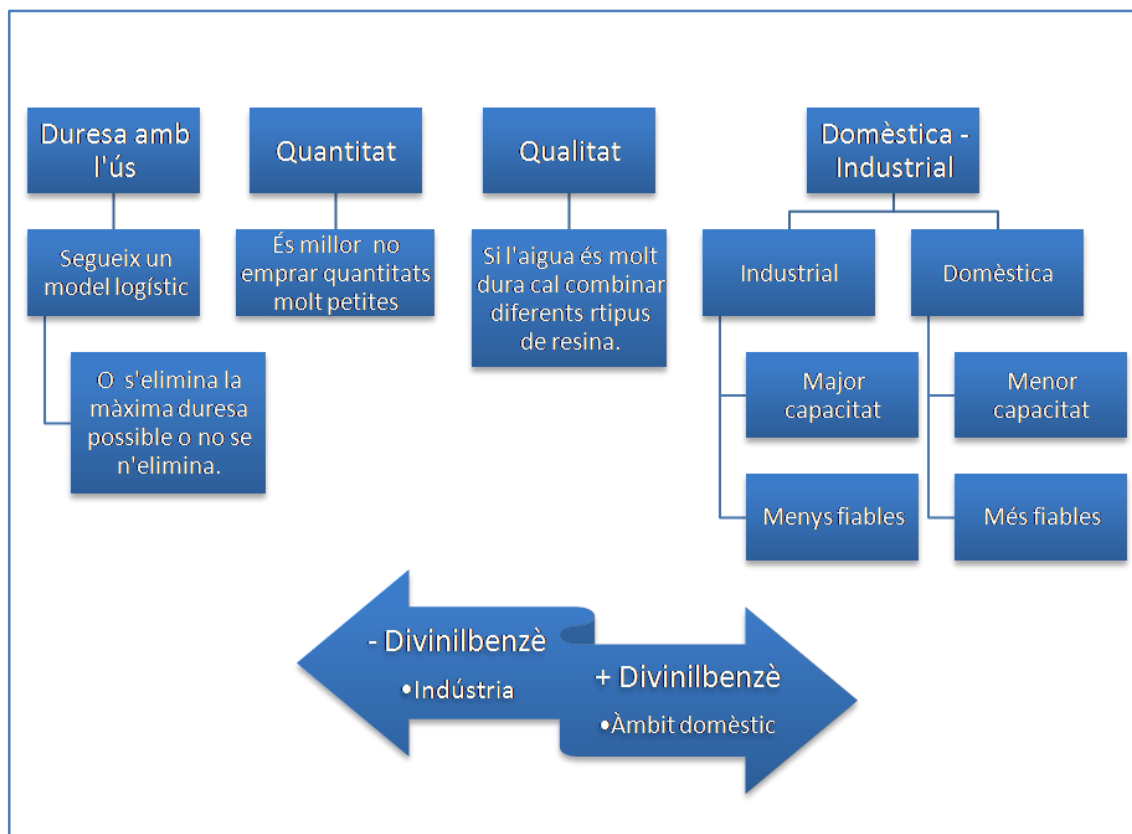
En conseqüència, podem dir que:

- Les resines domèstiques, tot i ser més fiables, se saturen abans que les industrials.
- Les resines industrials tenen un punt de saturació més brusc, però tracten més aigua i eliminen més duresa.

Això em servirà de suport per la següent conclusió.

Atès que les resines domèstiques triguen menys a saturar-se que les industrials, i que un major percentatge de divinilbenzè provoca menor capacitat d'intercanvi, i per tant, es produeix una saturació completa més aviat, puc deduir que les resines domèstiques haurien de tenir, teòricament, una major proporció de polímers de divinilbenzè. Llavors:

- El divinilbenzè proporciona menor capacitat d'intercanvi, pel que la resina pot eliminar menys duresa. Això li treu qualitat a l'àmbit industrial.
- El divinilbenzè dona a la resina una major fiabilitat, de manera que el pas d'aigua no saturada a saturada és molt menys brusc, el qual li dona major qualitat a l'àmbit domèstic.



Il·lustració 5 - Esquema-resum de les conclusions

5. Bibliografia

5.1 Llibres consultats

Adame S. Cáceres C. De la Lanza G. Hernández S. *Diccionario de hidrología y ciencias afines*. Ed. Plaza y Valdes (1999) .

American society of civil engineers; American water works association; Baruth E. *Water Treatment Plant Design*. Ed. McGraw-Hill (2005).

American water works association *Electrodialysis and Electrodialysis Reversal*. Ed. AWWA (American Water Works Association) (1996)

Aragón P. Gómez C. Marín L.L. *Análisis químico de suelos y aguas*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia (2002).

Baker R.W. *Membrane Technology and Applications*. Ed. Willey (2004).

Batalla R.J. Rovira A. Sala M. Úbeda X. *Guia pràctica per a l'estudi de l'aigua*. Ed. Universitat Barcelona (2002).

Billmeyer F.W. *Ciencia de los polímeros*. Ed. Reverté (2004).

Borchardt J.A. Weber W.J. Walter W.J. *Control de la calidad del Agua*. Ed. Reverté (2003).

Cheremisinoff N.P. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Ed. Butterworth-Heinemann (2002).

Costa J.M. *Diccionario de química física*, Ed. Díaz de Santos (2005).

Davis J.E. *Manual de laboratorio para química: Experimentos y teoría*. Ed. Reverté (1975).

Harland C.E. Grimshaw R.W. *Ion Exchange: Theory and Practice*. Ed. Royal Society of Chemistry (1994).

Harris D. C. *Análisis químico cuantitativo*. Ed. Reverté Barcelona (2006).

Hendriks D.W. *Water Treatment Unit Processes: Physical and Chemical*. Ed. CRC Press (2006).

Hung Y. Shammash N.K. Wang L.K. *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*. Ed. Humana Press (2007).

King, C.J. Costa J. *Procesos de separación*. Ed. Reverté (2003)

Laitinen H.A. Harris W.E. *Análisis químico: Texto avanzado y de referencia*. Ed. Reverté (1982).

Leidinger O. *Procesos industriales*. Ed. Fondo Editorial PUCP (1997).

Marín R. Rodríguez J.M. *Fisicoquímica de aguas*. Ed. Díaz de Santos (1999).

Muscroft S. *Plumbing: For Level 2 Technical Certificate and NVQ*, Ed. Newnes (2007)

Nemerow N. L Dasgupta A. *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ed. Díaz de Santos (1998).

Peinemann K. Pereira S. Inc NetLibrary *Membrane Technology: In the Chemical Industry, 2nd, Revised and Enlarged Edition*. Ed. Willey-VHC (2007).

Porter M.C. *Handbook of Industrial Membrane Technology*. Ed. Noyes publications (1990)

Primo E. *Química orgánica básica y aplicada: De la molécula a la industria*. Ed. Reverté (2003).

Ramôa F. *Zeolites: Science and Technology*, Ed. Springer (1983).

Rigola M. *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Ed. Macombo (1989).

Sincero A.P. Sincero G.A. *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater.*, Ed. IWA Publishing (2002).

Skoog, D.A. West D.N *Fundamentos de química analítica*. Ed. Reverté Barcelona(2005)

Els llibres sense lloc d'edició han estat consultats a través de d'Internet.

5.2 Pàgines web

AGUAPURA [en línia] <<http://aguapura.ecodeter.com/>> [consulta: 01.07.2008]

CITY OF NEW YORK [en línia] <http://nyc.gov/html/dep/html/drinking_water/index.shtml> [consulta: 25.10.2008]

CONSORCIO DE AGUAS (Bilbao) [en línia]
<https://www.consorciod eaguas.com/Web/cicloAgua/calidad_agua.aspx> [consulta: 23.10.2008]

EMPRESA MUNICIPAL DE AGUAS Y SANEAMIENTO DE MURCIA [en línia]
<<http://www.emuasa.es/empresa/analiticas.html>> [consulta: 29.10.2008]

GOOGLE INC. [en línia] <<http://books.google.es>> [consulta: 15.06.2008]

INDAGUA [en línia]
<http://www.induagua.com/articulos/osmosis_inversa_membrana_filtracion.asp> [consulta: 15.07.2008]

IONCAL TECHNOLOGIES [en línia] <http://www.ioncal.com/tecnologia_antical.php> [consulta: 30.07.2008]

LENNTECH [en línia] <<http://www.lenntech.com>> [consulta: 20.06.2008]

OCU [en línia] <<http://www.ocu.org>> [consulta: 20.10.2008]

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO [en línia]
http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/tema4/Paginas/Pagina17.htm
[consulta: 01.07.2008]

WEB ELECTRÓNICA [en línia]
<<http://www.clubse.com.ar/download/pdf/notasrevistas19/nota03.htm>> [consulta: 01.07.2008]

WHO [en línia] <<http://www.who.int/en/>> [consulta: 21.10.2008]

6. Agraïments

Abans de concloure aquest treball voldria agrair la tasca de:

La meva tutora del treball de recerca, així com la resta de professors que m'han ajudat durant tot el desenvolupament del treball.

La directora del centre, per donar-me accés a més fonts d'informació.

El meu oncle, sense el qui gran part del treball amb resines no hauria estat possible.

El meu pare i la resta de la meva família, per recolzar-me en el treball i contribuir en el primer prototip elèctric.

Josep Maria Sabaté, de *LyondellBasell*, per concedir-me una entrevista.

Rubén Gordillo, per la seva ajuda en l'ús d'*AutoCAD*.

Les empreses *A2* i *Aquamania*, per facilitar-me l'accés a resina i informació sobre aquesta.

Moltes gràcies!

7. Annexos

Índex dels annexos

7.1 Ampliació de dades	53
7.1.1 Resultats	53
7.1.2 Model matemàtic	60
7.2 Tractament de l'aigua: Descalcificació	64
7.2.1 Intercanvi iònic amb resines	64
7.2.2 Osmosi inversa	71
7.2.3 Mètodes elèctrics: Electrodialisi - Electrodialisi inversa – Electrodesionització	75
7.2.4 Inhibidors d'incrustació	80
7.3 Projectes addicionals	82
7.3.1 Els camps elèctrics com a eix central	82
7.3.2 Prototip de canonades amb alt voltatge	82
7.3.3 Prototip de "separador" de duresa	90
7.3.4 Idees no dutes a terme	92
7.3.5 Conclusió final	93
7.4 Treball teòric	94
7.4.1 Entrevista	94
7.4.2 Comparativa d'aigües	97
7.5 Documentació addicional	102
7.5.1 Marc legislatiu a Espanya	102
7.5.2 Anàlisi de l'aigua de Reus	104

7.1 Ampliació de dades

7.1.1 Resultats

Aquí es mostren detalladament els resultats de totes les anàlisis i les representacions gràfiques dels factors calculats indirectament: pH i sodi.

	Resina (g)	Aigua (l)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	Mitjana	Duresa (mgCaCO ₃ /l)	Sodi (mg/l)
Domèstica	10g	0	2,3	2,3	2,33	2,31	231,00	255,74
		1	2,32	2,3	2,3	2,31	230,67	255,89
		2	2,32	2,32	2,33	2,32	232,33	255,13
		3	2,65	2,58	2,6	2,61	261,00	241,94
		4	2,7	2,75	2,76	2,74	273,67	236,11
		5	3,28	3,4	3,36	3,35	334,67	208,05
		6	3,5	3,5	3,5	3,50	350,00	201,00
		7	3,7	4	3,7	3,80	380,00	187,20
		8	4	3,98	4	3,99	399,33	178,31
		9	4	4	4	4,00	400,00	178,00
	20g	0	0,78	0,71	0,72	0,74	73,67	328,11
		0,5	0,9	0,9	0,9	0,90	90,00	320,60
		1	1	0,95	0,99	0,98	98,00	316,92
		1,5	1,23	1,3	1,2	1,24	124,33	304,81
		2	1,53	1,52	1,52	1,52	152,33	291,93
		2,5	1,9	1,9	1,91	1,90	190,33	274,45
		3	1	0,35	0,35	0,57	56,67	335,93
		3,5	1,7	1,7	1,7	1,70	170,00	283,80
		4	1,75	1,75	1,75	1,75	175,00	281,50
		5	2,93	2,93	2,93	2,93	293,00	227,22
		6	3,7	3,7	3,7	3,70	370,00	191,80
		7	4	4	4	4,00	400,00	178,00
		8	4	4	4	4,00	400,00	178,00

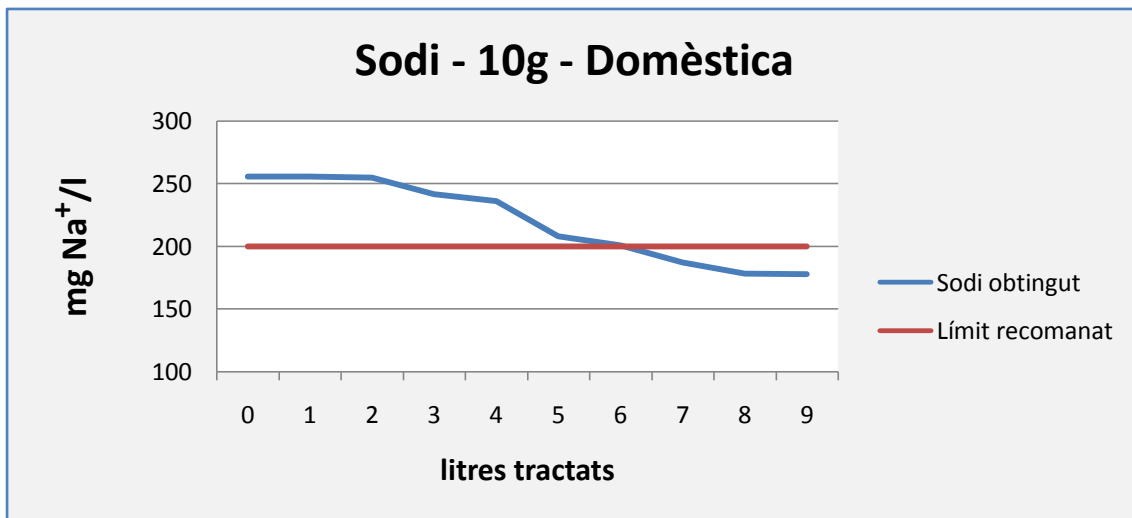
Els resultats amb vermell han de correspondre a errors de procediment, pel que no s'han fet servir en certes parts del tractament matemàtic

	Resina (g)	Aigua (l)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	Mitjana	Duresa (mgCaCO ₃ /l)	Sodi (mg/l)
Domèstica	40g	0	0,2	0,2	0,2	0,20	20,00	352,80
		1	0,2	0,2	0,2	0,20	20,00	352,80
		2	0,25	0,25	0,23	0,24	24,33	350,81
		3	0,25	0,25	0,25	0,25	25,00	350,50
		4	0,4	0,45	0,43	0,43	42,67	342,37
		5	0,6	0,6	0,6	0,60	60,00	334,40
		6	1	1	1,05	1,02	101,67	315,23
		7	1,55	1,5	1,55	1,53	153,33	291,47
		7,5	1,79	1,8	1,77	1,79	178,67	279,81
		8	2,05	2,05	2,1	2,07	206,67	266,93
		8,5	2,55	2,55	2,53	2,54	254,33	245,01
		9	2,87	2,9	3	2,92	292,33	227,53
		9,5	3,15	3,17	3,17	3,16	316,33	216,49
		10	3,58	3,57	3,62	3,59	359,00	196,86
		11	3,95	4	4,02	3,99	399,00	178,46
		12	4	4	4,05	4,02	401,67	177,23
	50g	0	0,08	0,07	0,08	0,08	7,67	358,47
		1	0,07	0,07	0,07	0,07	7,00	358,78
		2	0,07	0,07	0,07	0,07	7,00	358,78
		3	0,1	0,1	0,08	0,09	9,33	357,71
		4	0,1	0,09	0,1	0,10	9,67	357,55
		5	0,12	0,15	0,13	0,13	13,33	355,87
		6	0,35	0,35	0,35	0,35	35,00	345,90
		7	0,45	0,45	0,45	0,45	45,00	341,30
		8	0,7	0,7	0,7	0,70	70,00	329,80
		9	1	1	1	1,00	100,00	316,00
		10	1,8	1,8	1,8	1,80	180,00	279,20
		11	2,55	2,45	2,6	2,53	253,33	245,47
		11,5	3,06	3,07	3,07	3,07	306,67	220,93
		12	3,52	3,45	3,46	3,48	347,67	202,07
		13	4	4	4	4,00	400,00	178,00
		14	4	4	4	4,00	400,00	178,00

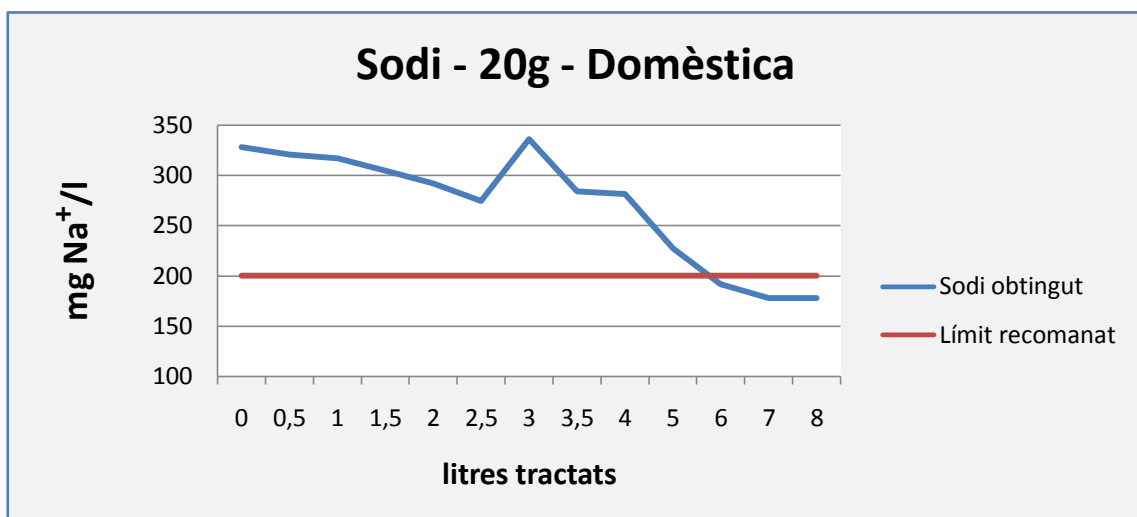
Taula 9 - Resultats de les anàlisis amb resina domèstica

	Resina (g)	Aigua (l)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	EDTA (ml)	Mitjana	Duresa (mgCaCO ₃ /l)	pH
Industrial	10g	0	1,2	1,12	1,12	1,15	114,67	2,24
		1	1,2	1,17	1,18	1,18	118,33	2,25
		2	1,6	1,63	1,6	1,61	161,00	2,32
		3	2,18	1,13	2,15	1,82	182,00	2,36
		4	2,1	2,1	2,14	2,11	211,33	2,42
		5	2,6	2,55	2,55	2,57	256,67	2,54
		6	3,2	3,15	3,2	3,18	318,33	2,79
		7	3,6	3,6	3,6	3,60	360,00	3,01
		8	3,8	3,8	3,82	3,81	380,67	3,41
		9	4	4	4	4,00	400,00	7,88
		10	4	4	4	4,00	400,00	7,88
	20g	0	0,25	0,24	0,25	0,25	24,67	2,12
		1	0,3	0,3	0,3	0,30	30,00	2,13
		2	0,28	0,3	0,3	0,29	29,33	2,13
		3	0,35	0,35	0,35	0,35	35,00	2,14
		4	0,35	0,32	0,36	0,34	34,33	2,14
		5	0,45	0,47	0,46	0,46	46,00	2,15
		7,5	2,3	2,29	2,3	2,30	229,67	2,47
		8	2,54	2,5	2,52	2,52	252,00	2,53
		8,5	3,26	3,3	3,3	3,29	328,67	2,85
		9	3,75	3,8	3,8	3,78	378,33	3,36
		10	3,9	4	3,9	3,93	393,33	3,88
		11	4	4	3,9	3,97	396,67	4,18
	30g	0	0,07	0,07	0,07	0,07	7,00	2,10
		1	0,07	0,08	0,07	0,07	7,33	2,10
		2	0,1	0,07	0,08	0,08	8,33	2,11
		3	0,08	0,1	0,09	0,09	9,00	2,11
		4	0,1	0,08	0,07	0,08	8,33	2,11
		5	0,1	0,1	0,09	0,10	9,67	2,11
		6	0,1	0,1	0,1	0,10	10,00	2,11
		7	0,1	0,09	0,1	0,10	9,67	2,11
		8	0,45	0,45	0,46	0,45	45,33	2,15
		9	1,1	1,08	1,15	1,11	111,00	2,24
		10	1,9	1,95	1,95	1,93	193,33	2,38
		11	3,1	3,1	3,05	3,08	308,33	2,74
		11,5	3,75	3,8	3,8	3,78	378,33	3,36
		12	3,93	4	3,95	3,96	396,00	4,1
		13	4	4	4	4,00	400,00	7,88

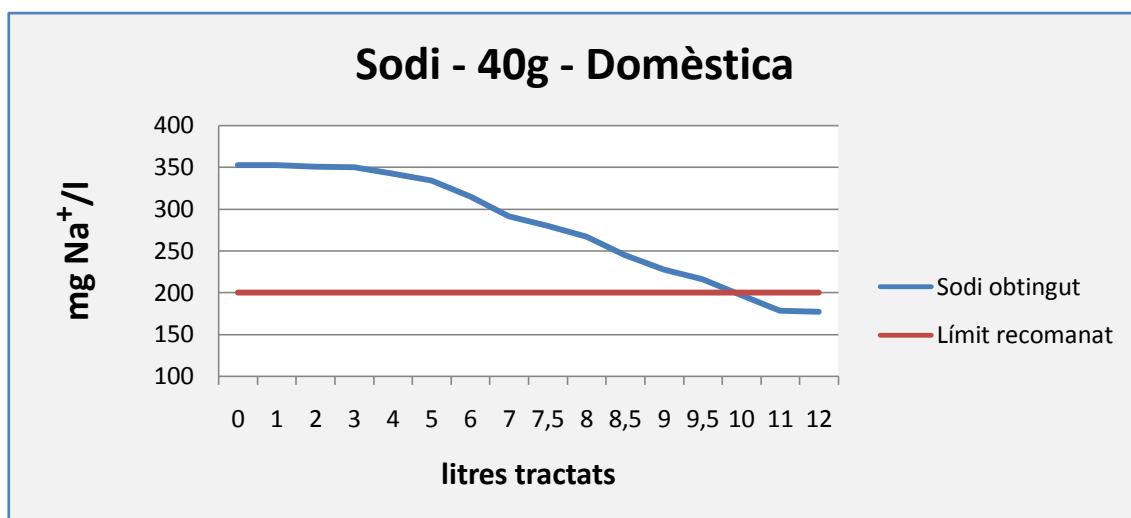
Taula 10 - Resultats de les anàlisis amb resina industrial



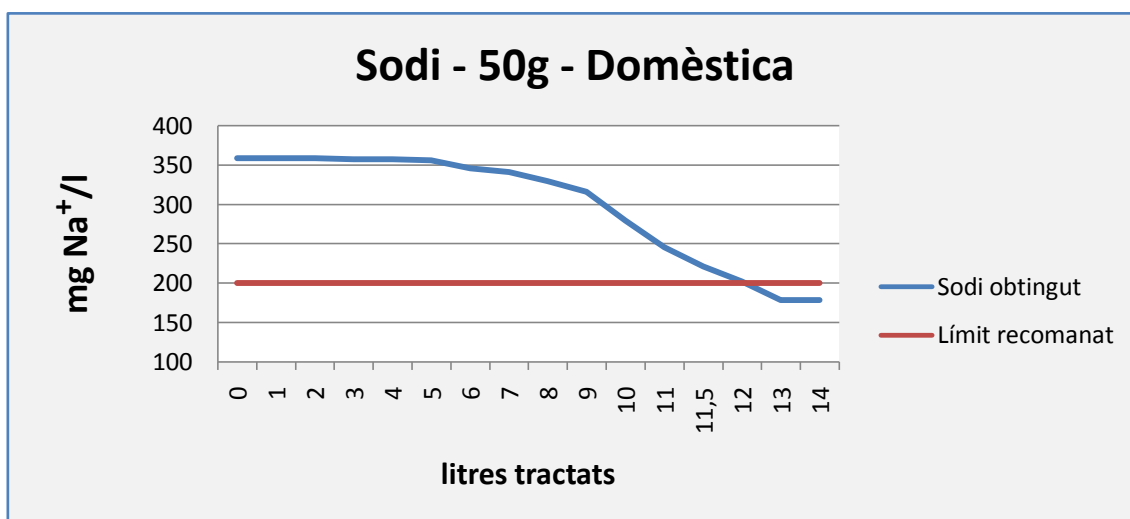
Gràfic 7 - Evolució del nivell de sodi amb 10g de resina domèstica



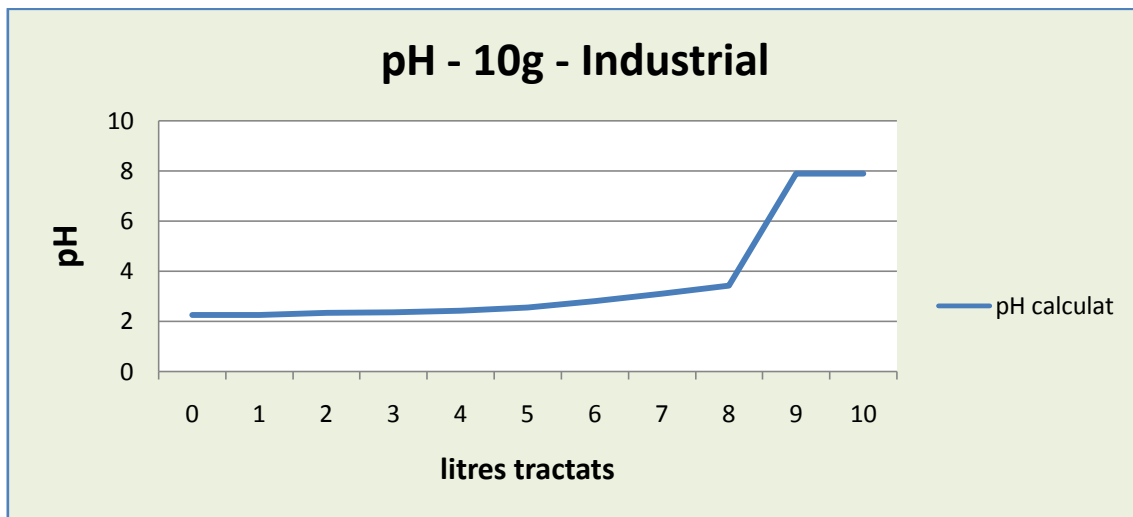
Gràfic 8 - Evolució del nivell de sodi amb 20g de resina domèstica



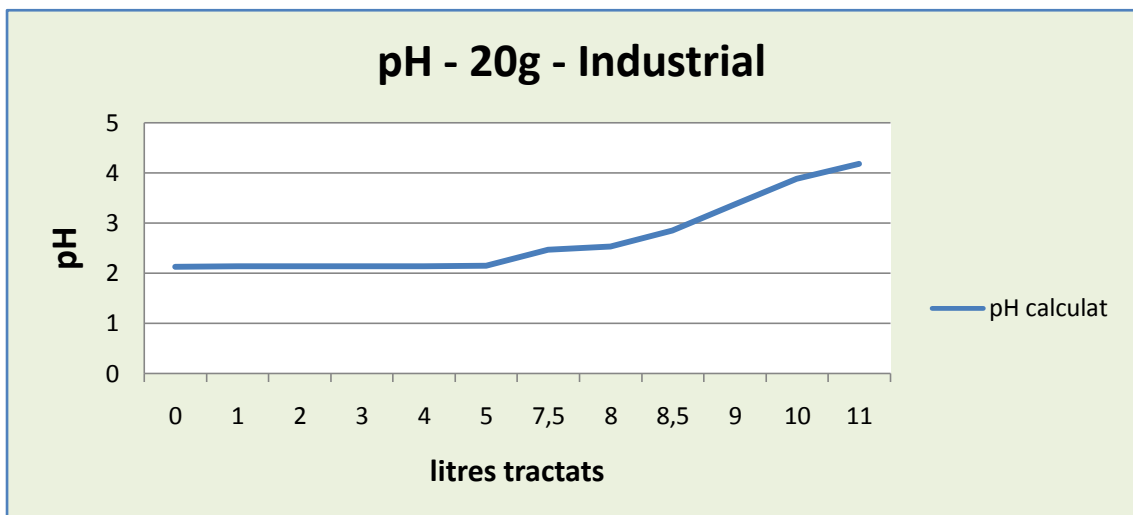
Gràfic 9 - Evolució del nivell de sodi amb 40g de resina domèstica



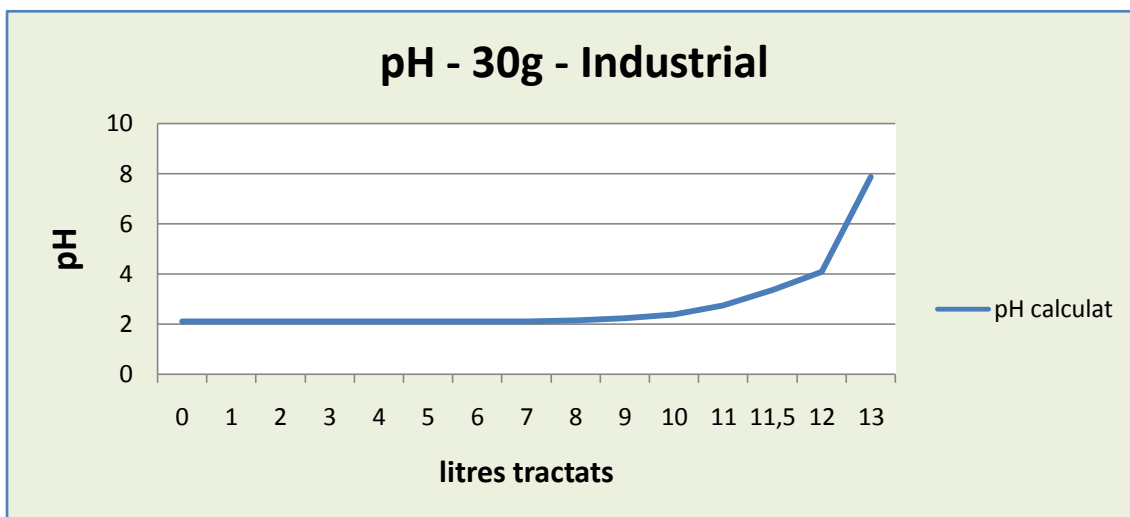
Gràfic 10 - Evolució del nivell de sodi amb 40g de resina domèstica



Gràfic 11 - Evolució del pH amb 10g de resina industrial



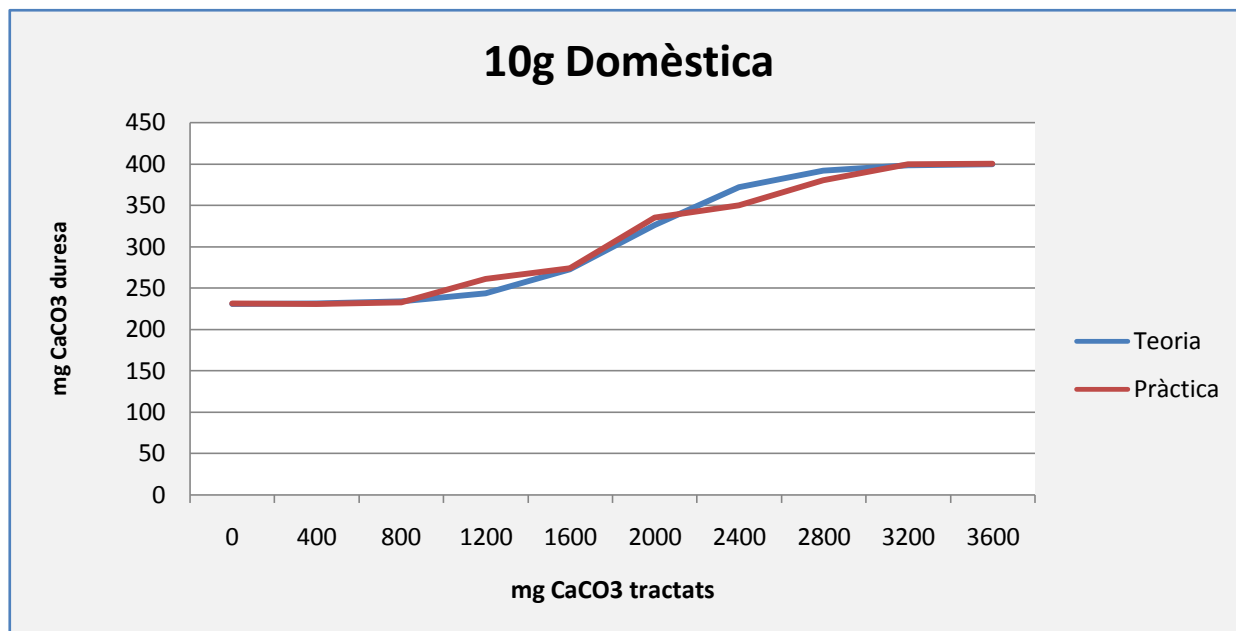
Gràfic 12 - Evolució del pH en 20g de resina industrial



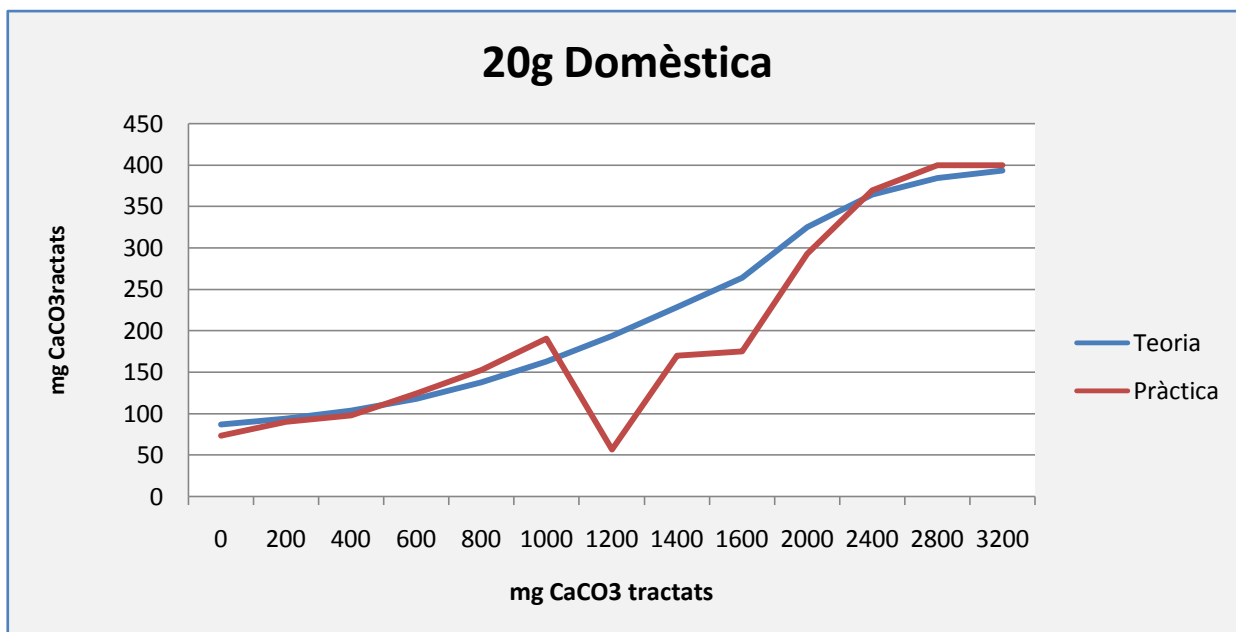
Gràfic 13 - Evolució del pH amb 30g de resina industrial

7.1.2 Model matemàtic

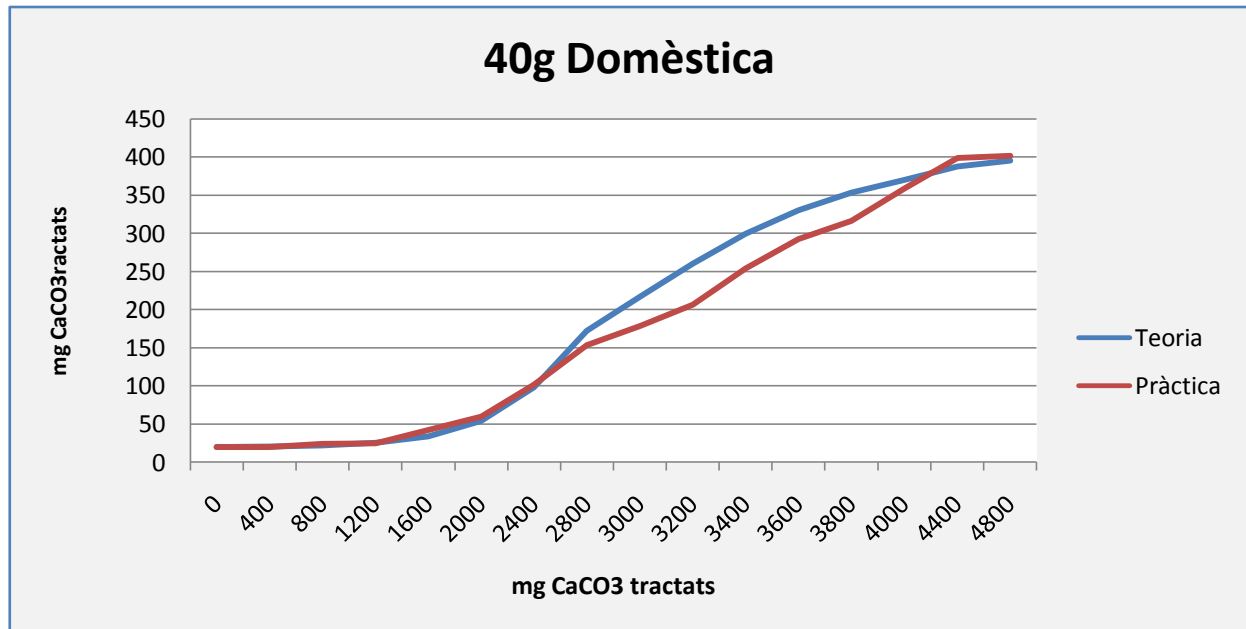
Per tal de valorar visualment el tractament matemàtic, adjunto els gràfics corresponents a les funcions obtingudes junt amb les dades utilitzades:



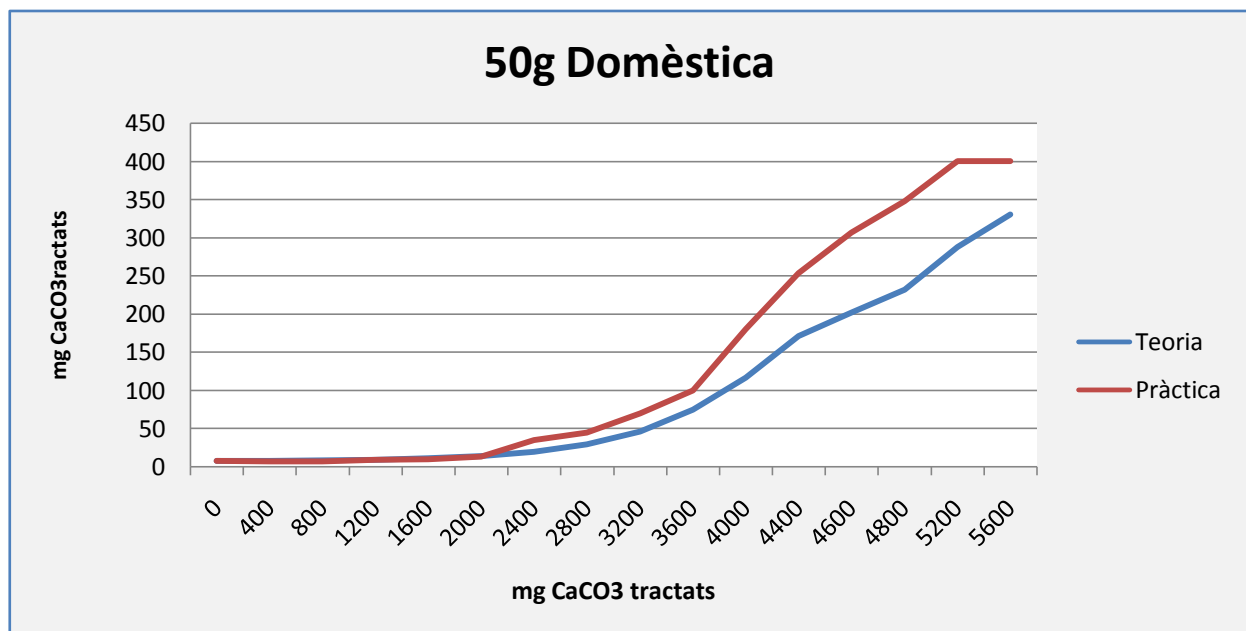
Gràfic 14 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 10g de resina domèstica



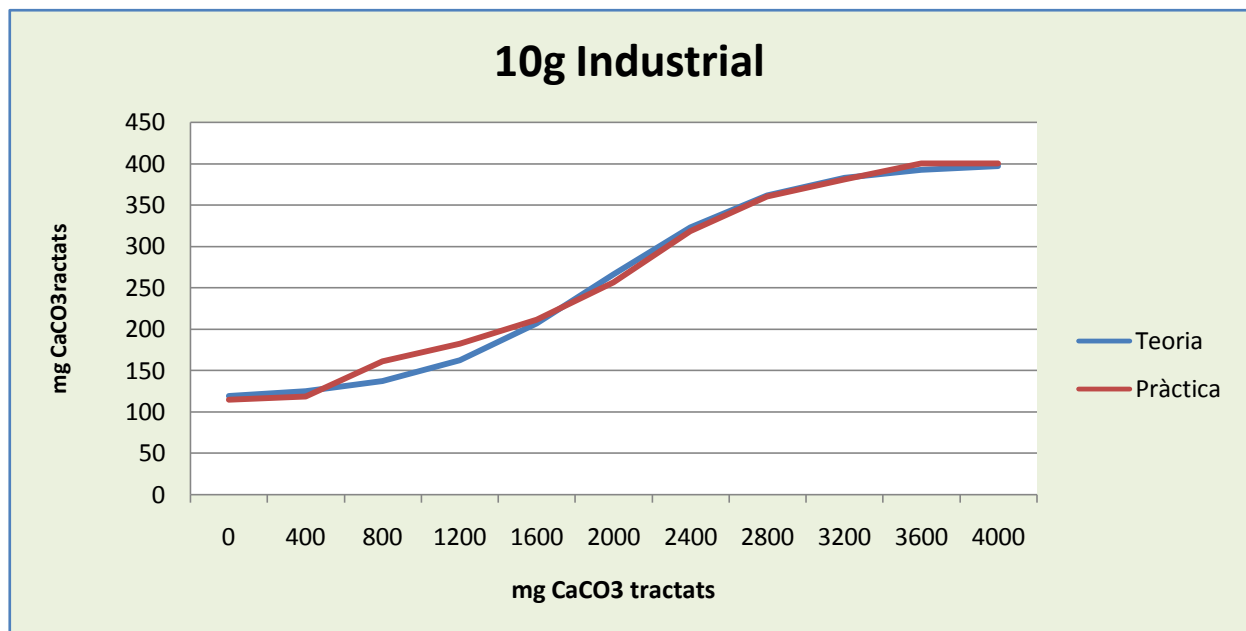
Gràfic 15 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 20g de resina domèstica



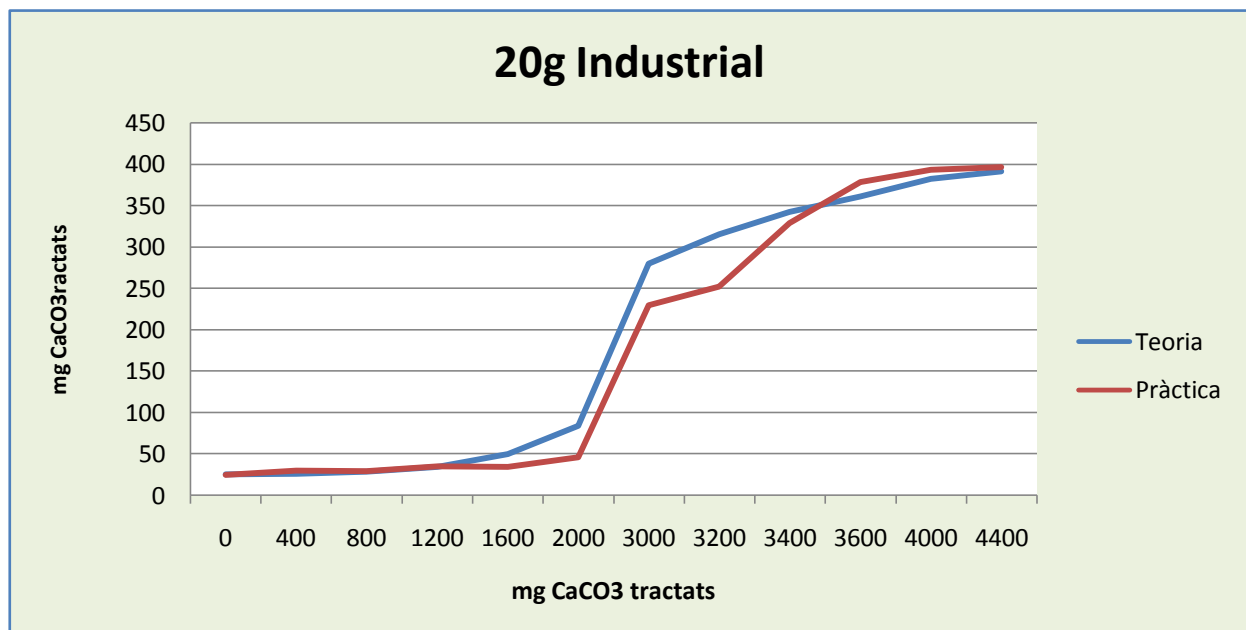
Gràfic 16- Comparativa teoria - pràctica del comportament de 40g de resina domèstica



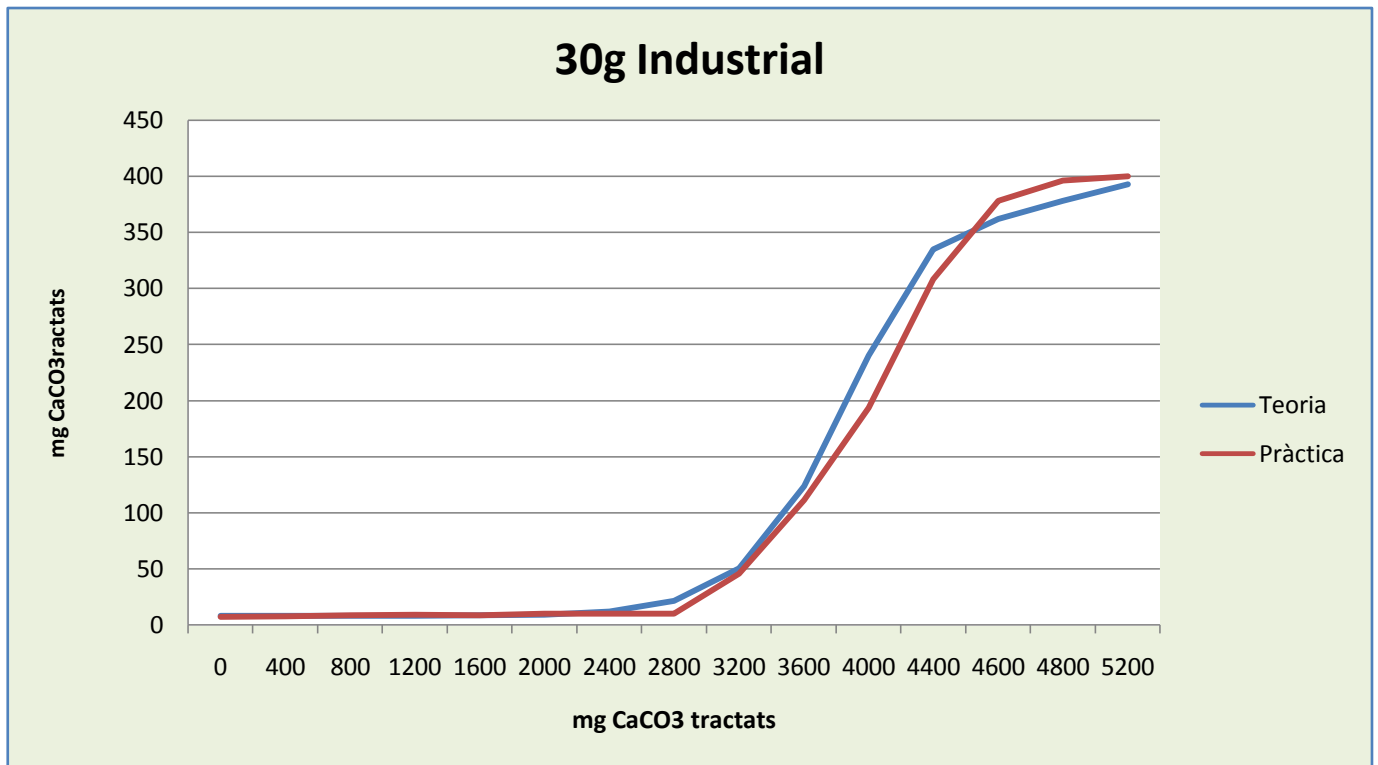
Gràfic 17 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 50g de resina domèstica



Gràfic 18 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 10g de resina industrial



Gràfic 19 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 20g de resina industrial



Gràfic 20 - Comparativa teoria - pràctica del comportament de 30g de resina industrial

7.2 Tractament de l'aigua: Descalcificació

Inicialment, vaig concebre aquest apartat com la introducció teòrica del treball. Després de consultar-ho amb la tutora, vam pensar que era un apartat massa específic i extens.

Ja que no volia eliminar tota aquesta recopilació d'informació de tan diverses fonts (com es pot veure en la bibliografia), vaig decidir incloure-la en els annexos.

Els principals mètodes descalcificadors són:

7.2.1 Intercanvi iònic amb resines

A causa de la seva economia i rendiment, el mètode més utilitzat per disminuir la duresa de les aigües és el intercanvi iònic amb resines.¹⁰

El intercanvi iònic és un procés en el que els ions d'una dissolució que entra en contacte amb un determinat sòlid porós, es transfereixen a aquest últim, rebent a canvi altres ions. Podem deduir, per tant, que es tracta d'una transferència de matèria líquid-sòlid, on els ions es difonen en els dos sentits. Aquest intercanvi és reversible.

Factors més avançats com l'equilibri del intercanvi iònic o la transferència de matèria afecten el rendiment del procés.

Els sòlids són, a la majoria dels casos, resines sintètiques. Tot i així, hi ha certs materials naturals que presenten aquestes característiques, com ara les argiles i les zeolites.

Les resines són d'alt pes molecular, resistència física i química, insolubles i d'aspecte granular. Estan compostes per polímers sintètics d'hidrocarburs amb certs grups funcionals iònics: contra-ions (com ions H^+ , Na^+ o OH^-). La resina, però, és elèctricament neutra, això es deu a la presència de co-ions, de carga oposada a la dels grups funcionals anteriors. Els hidrocarburs donen tenacitat i insolubilitat a la resina.

Estan compostes majoritàriament per copolímers d'estirè amb certes unitats de divinilbenzè. També existeixen altres amb un copolímer d'àcid acrílic en lloc del d'estirè, però pel al seu caràcter poc àcid, només s'utilitza en resines aniòniques. El polímer també pot estar format

¹⁰ En canvi, no és recomenable un ús exclusiu en l'àmbit de la purificació: no capta components orgànics.

per altres grups polimeritzants, com l'epoxi¹¹. Les proporcions dels diferents polímers de les resines determinen les seves característiques. Un major percentatge de divinilbenzè (normalment entre 4 i 12%) dona més rigidesa i menys porositat (no s'infla tant amb l'aigua); més resistència elèctrica i menor capacitat d'intercanvi¹². De la mateixa manera, el grau de reticulació¹³ de la resina permet evitar el pas d'ions de mides concretes, sent més selectiva per a ions petits a major quantitat de divinilbenzè (DVB). Els efectes contraris s'apliquen en cas de disminuir el percentatge de DVB.

➤ *Classificació*

Podem dividir les resines segons 2 trets.

Tipus d'ió

Segons la càrrega dels ions captats per les resines, existeixen.

- Resines catióniques: Que capten ions positius (Mg^{2+} , Ca^{2+} , $Fe^{2/3+}$...). Els seus grups funcionals són àcids.
- Resines aniòniques: Que capten anions. Els seus grups funcionals són bàsics

Caràcter

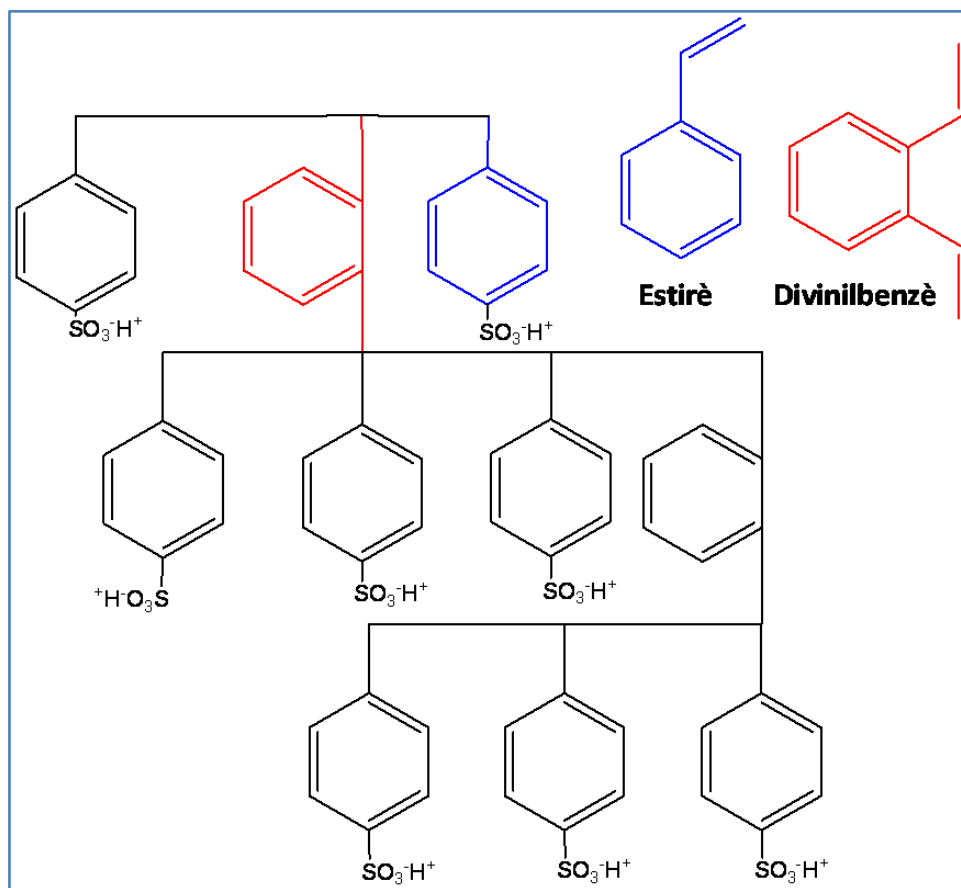
Segons el caràcter podem diferenciar entre resines fortes o dèbils.

- Les resines fortes actuen en qualsevol pH i poden atrapar tot tipus de cations/anions; per contrapartida, tenen una regeneració més costosa i la seva capacitat és limitada (cal regenerar-la més sovint).
- Les resines dèbils només actuen en certs nivells de pH i són selectives: tan sols retenen certes substàncies. Presenten major capacitat i rendiment de regeneració.

¹¹ Epoxi: Bàsicament un poliéster. Format per la condensació de difeniol propà.

¹² Capacitat d'intercanvi: Grups iònics per unitat de pes.

¹³ Reticulació: Grau de d'interconnexió, connexió en forma de red.



Il·lustració 6 - Estructura del polímer d'estirè i divinilbenzè

Per això, existeixen els següents tipus de resines:

Resines catióniques fortes

- Polímers d'estirè amb certes unitats de divinilbenzè. Aproximadament cada grup de benzè té un radical sulfoni ($-\text{SO}_3\text{H}$; SO_3Na) o derivats d'un altre àcid fort (com SO_4H_2).
- La selectivitat augmenta amb el nombre de possibles valències del catió, sent els trivalents els que presenten la màxima selectivitat i els monovalents la inferior.
- Són molt estables i duradores. i Donen poca fuga d'ions i suporten temperatures de més de 100°C
- **Aquestes resines són utilitzades a la descalcificació**, utilitzant una columna amb resina que es regenera amb sodi.

Les resines d'ús industrial busquen la purificació de l'aigua, pel que utilitzen resines que desprenen H^+ , no Na^+ . Aquestes resines, combinades amb les aniòniques, desionitzen totalment l'aigua. Per contra, la seva regeneració no pot ser efectuada amb Na^+ (ja que no és el seu grup funcional), sinó que cal l'aplicació d'àcids en el cas de les catióniques (sulfúric o clorhídric, entre altres), i bases com l'hidròxid de sodi per les aniòniques.

Resines catióniques febles

- Els radicals d'aquestes són àcids carboxílics, àcid fosfònic, fenòlic i altres àcids febles. Els seus hidrogenions es combinen per altres cations que poden estar units a anions com carbonats, però no clorurs o nitrats (han de ser sempre més febles que l'àcid acètic, que és de força similar als primer radicals esmentats).
- Tan sols actuen en pH superior a 4. En valors menors el grup carboxil es protona i no s'uneixen als cations del líquid.
- Presenten una fuga de Na^+ alta.

Resines aniòniques fortes

- Tenen radicals d'amoni quaternari ($-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{OH}^-$). El OH^- s'intercanvia pel anions del fluid.
- Són més selectives amb anions divalents que no pas els monovalents.
- Es poden utilitzar a qualsevol pH.
- Duren menys que les catióniques fortes i resisteixen menor temperatura.
- Perden capacitat progressivament a l'absorbir àcids húmics.

Resines aniòniques febles

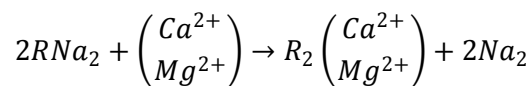
- Tenen radicals bàsics febles, com el grup amina. Per això, com les catióniques febles, , intercanvien els seus anions (OH^-) pels dels àcids febles (com el carbònic o el silícic).
- En valors superiors a pH 6 el grup carboxil es desprotona i no es produeix captació d'anions.
- Tenen el doble de capacitat que les aniòniques fortes. No es veuen afectades pels àcids húmics i altres substàncies orgàniques.

➤ *Aplicació a la descalcificació*

Com es va observar a seccions anteriors, els ions de calci i magnesi són els que afecten a la duresa de l'aigua, originant tot un conjunt de problemes. La duresa temporal s'elimina utilitzant les resines catióniques d'àcid fort (amb DVB entre 8-12%), normalment en forma de gel, excepte quan tractem l'aigua a altes temperatures (llavors caldrà utilitzar resines de macroporus). És necessari aprofundir sobre el comportament d'aquestes resines; per què eliminen tan sols la duresa (quan les resines catióniques fortes capten tots els cations) i quin és exactament el mecanisme que permet la seva regeneració.

Com ja hem dit, aquestes resines contenen grups catiónics equilibrats elèctricament pels seus contraions. Si submergim la resina en una solució que contingui un catió diferent, es produirà un desequilibri de concentracions en un doble sentit (en les resines el catió de la dissolució, i en la solució, el de la resina). Això acabarà provocant un intercanvi d'ions per arribar a un equilibri de concentracions.

A més, les resines mantenen en tot moment la seva electronegativitat. D'aquesta manera, dos ions monovalents de la resina (Na^+) s'intercanviaran per un de bivalent (Mg^{2+} , Ca^{2+}) o bé, cadascun per un altre de monovalent.

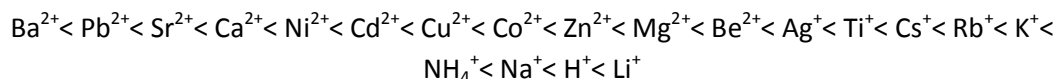


En la descalcificació s'utilitzen resines en forma sòdica, és a dir, amb ions sodi que s'intercanviaran per altres de la solució (els motius es veuran més endavant).

➤ *L'afinitat relativa*

Segons el seu grandària i la seva càrrega, els ions presenten un ordre de preferència a l'hora de ser captats per les resines d'intercanvi iònic. Ions de valència elevada són més afins a ser captats, ja que a major càrrega, l'atracció iònica augmenta. A major radi iònic, major afinitat.

Resines catióniques àcid fort:



Els cations de Mg^{2+} i Ca^{2+} tenen una prioritat moderada; hi ha ions més afins a ser atrapats. Tot i així, aquests es presenten en una concentració molt menor en l'aigua, el que provoca que els ions responsables de la duresa siguin els captats majoritàriament.

Una vegada els ions Na^+ de la resina s'han esgotat (és a dir, han sigut desplaçats per altres de més afins), la resina se satura i no pot descalcificar més aigua. Cal regenerar-la. Per fer-ho, cal intercanviar els ions de magnesi i calci per uns altres de menor afinitat; si fossin de major afinitat, després seria més difícil que captessin Mg^{2+} o Ca^{2+} .

Normalment, les resines utilitzen el H^+ (en desmineralització) o el Na^+ . A causa de la fàcil regeneració del sodi, és el majoritari en processos de no desmineralització.

Com es veu al requadre, els ions de sodi tenen menys preferència que no els de calci o magnesi. Això dificulta la regeneració. És necessari utilitzar una solució amb **elevada** concentració de sal (salmorra), d'aquesta manera, la manca d'afinitat es veu compensada per una necessitat d'igualar les concentracions del catió: els ions de magnesi i calci s'intercanvien pels de sodi per arribar a un equilibri de concentracions, permetent un nou ús de la resina.

El procés de salmorra requereix que durant el període de renovació de la resina, l'aigua sortint tingui una major duresa, i per tant, no sigui òptima per a ser utilitzada.

Com és evident, al llarg del temps les resines aniran perdent efectivitat (regions no regenerades completament, pèrdues), pel que caldrà canviar-les per altres de noves.

➤ *Components*

Els principals components d'un descalcificador de resines d'intercanvi iònic són:

- Tanc: On es troben les resines. L'aigua hi circula i surt descalcificada.
- Resines
- Dipòsit de sal: Un recipient amb aigua i sal, s'hi produeix la salmorra.
- Vàlvula: Regulant la circulació d'aigua i el seu sentit, controla les diferents etapes de l'aparell, permetent la regeneració.

➤ *Cicles de funcionament*

Els cicles de funcionament de les resines són dos:

Descalcificació

- Un flux d'aigua circula pel llit de resines per acció de la vàlvula. Durant aquesta etapa es disposa d'aigua més tova.
- Després d'un determinat període de temps (segons la naturalesa de les resines, l'aigua i el cabal), caldrà aplicar el segon cicle.

Regeneració

Podem distingir dos grans tipus de regeneració segons l'ordre de les seves fases i la circulació de la solució de sal concentrada:

Fases de la regeneració co-corrent

- Contrarentat
 - S'eliminen sediments, residus i altres restes gràcies a un flux d'aigua en sentit invers al normal (de baix cap a dalt) que els arrossega al desguàs. Normalment s'utilitza el màxim cabal possible.
- Aspiració de la salmorra
 - La solució de salmorra del dipòsit de sal és aspirada en el sentit habitual del corrent (co-corrent; de dalt cap a baix) gràcies a l'efecte Venturi ¹⁴ del injector. D'aquesta manera, s'intercanvia el sodi amb les parts superiors de l'aparell, normalment més saturades. El calci i magnesi que s'allibera acaba saturant les capes inferiors. Que es regeneren posteriorment. La circulació d'aigua és lenta i el cabal baix.
- Esbandida lenta
 - Quan certa quantitat de salmorra ha sigut aspirada, es tanca la vàlvula que en proporciona. L'aigua restant no conté solució i circula en el mateix sentit que l'aspiració, permetent l'expulsió de residus per desguàs i la circulació de la solució per la resta del llit de resines.

¹⁴ Efecte venturi: Quan un fluid circula d'un conducte a un altre més estret, augmenta la seva velocitat.; en conseqüència, disminueix la seva pressió. Això es coneix com efecte Venturi.

- Esbandida ràpida
 - Les resines s'esbandeixen amb aigua en ràpida circulació per eliminar possibles residus i restes de salmorra, que elevaria el nivell de sal de l'aigua.
- Ompliment del dipòsit de sal
 - La salmorra s'obté afegint aigua al dipòsit de sal prèviament omplert del descalcificador. Posteriorment, una vàlvula prepara la solució de salmorra necessària.

Fases de la regeneració contra-corrent

- Ompliment del dipòsit de sal
 - Igual que l'anterior.
- Aspiració salmorra
 - La única diferència respecte l'anterior mètode és només el sentit de la salmorra. Al mètode contracorrent la salmorra flueix de les capes inferiors a les superiors; així, no cal regenerar les capes inferiors encara no saturades, el qual comporta un conseqüent augment de rendiment i estalvi de salmorra.
- Esbandida lenta
 - En aquesta fase, el sentit de l'aigua és el mateix que a l'aspiració, per tant, és en contra de l'habitual.
- Contrarentat
 - Igual que l'altra, també en contra del sentit habitual.
- Esbandida ràpida
 - Idèntica a la del mètode co-corrent.

Avantatges: Major rendiment i estalvi d'aigua i salmorra.

Actualment, aquest últim sistema és el més utilitzat, ja que comporta un increment de rendiment del 100% .

➤ *Varietats comercials*

Per evitar augments de duresa puntuals durant la regeneració, actualment trobem al mercat tota una gamma de solucions a l'hora de determinar quan i com realitzem la salmorra.

- Descalcificadors cronomètrics
 - Les dues fases del descalcificador es regulen amb un rellotge programador. Aquest alterna els dos cicles de l'aparell a una hora programada calculada a partir d'un consum hipotètic.
 - Com és evident, aquest sistema presenta desavantatges. Suposa un determinat consum, el qual, si no es produeix, comporta regeneracions innecessàries i , conseqüentment, una despesa de sal i aigua.
- Descalcificadors volumètrics
 - Els descalcificadors volumètrics utilitzen un programador que determina el moment de la regeneració segons l'aigua utilitzada i dades sobre la seva

composició i capacitat de les resines. Aquesta informació ve donada per una turbina incorporada a la vàlvula o per un comptador emissor d'impulsos de la línia d'aigua. Podem distingir 3 variants. Les dues primeres són amb regeneració co-corrent.

- Sistema volumètric simple
 - La regeneració comença una vegada s'hagi processat el volum total d'aigua que el descalcificador pot tractar, o bé ajorna el procés a una hora de baix consum (la matinada). Mentrestant, però, l'aigua no podrà ser tractada, tenint nivells de duresa més elevats.
- Sistema volumètric de microprocessat
 - Un programador controla l'aigua tractada i la capacitat restant de les resines. Segons això, es pot produir una regeneració immediata si l'aparell esgota tota la seva capacitat, o bé a una hora determinada si les resines tenen capacitat per a menys d'un dia. El consum diari es calcula segons un conjunt de taules.
- Sistema volumètric de regeneració proporcional-contracorrent
 - És també un mètode de microprocessat. Es diferencia de l'anterior per considerar la capacitat d'intercanvi esgotada a l'hora de realitzar els càlculs per determinar el moment de la regeneració, així com també pel procés de regeneració a contracorrent.

Hi ha una enorme varietat de resines, així com diversos proveïdors.

7.2.2 Osmosi inversa

Anomenem osmosi a aquell fenomen físic que es produeix quan dues dissolucions de diferent concentració d'un cert solut es troben separades per una membrana semipermeable (que només deixa fluir el dissolvent d'una banda a l'altra). En aquestes condicions, el dissolvent flueix espontàniament de la banda més diluïda a l'altra per tractar d'igualar concentracions¹⁵.

Aquest flux finalitza (moment en què el transport de dissolvent és el mateix en ambdós sentits), quan, a causa del increment de volum a la banda de més concentrada, augmenta també la pressió, i en conseqüència també la tendència del dissolvent a escapar-se, arribant a un determinat valor anomenat pressió osmòtica en què la diferència de concentracions es compensa amb la pressió.

La pressió osmòtica també és un mètode útil per mesurar diferència de concentracions: són proporcionals.

¹⁵ D'aquesta manera el sistema assoleix una major homogeneïtat o equilibri, o el que és el mateix, augmenta l'entropia del sistema.

L'osmosi inversa (o hiperfiltració), utilitza un procés per anar contra la tendència natural del dissolvent. Si s'aconsegueix de manera artificial incrementar la pressió a la banda més concentrada per damunt de la pressió osmòtica, llavors esdevindrà el procés invers a l'osmosi, l'aigua fluirà de la banda més concentrada a l'altra, ja que l'equilibri pressió-concentració s'haurà tornat a trencar, ara, a l'inrevés.

Aquest sistema presenta un important inconvenient, la polarització de la concentració: la majoria dels ions romanen a una banda de la membrana. Això provoca precipitació del solut en aquesta, obstruint els seus porus, i en conseqüència, reduint el cabal. L'esmentat fet, unit a alteracions del pH, pot produir contaminació.

L'aplicació comercial o industrial del procediment és clara: s'introdueix aigua pura o amb menor concentració de solut/s (segons l'ús que es vulgui donar a d'instal·lació), a una banda de la membrana, i l'aigua que es desitja purificar a l'altra. Posteriorment s'augmenta la pressió a la banda amb impureses per sobre del valor de pressió osmòtica. Obtindrem dos fluxos d'aigua, un flux augmentat d'aigua més pura (filtrat o permeat) i un altre flux més reduït, que estarà més concentrat i serà evacuat (retingut). Com és evident, a major pressió, l'osmosi inversa serà més efectiva, ja que hi haurà un major volum d'aigua tractat.

➤ *Aplicacions*

El sistema d'osmosi inversa té un gran espectre d'ús a causa de les seves qualitats: és un procés de purificació d'una sola etapa, de fàcil manteniment, alt rendiment i espai reduït. S'utilitza en purificació d'aigües salobres o dessalinització, així com també a la indústria alimentària¹⁶ i farmacèutica.

Per contra, els seus majors inconvenients són l'alta inversió inicial i la presència de pressions elevades amb la consegüent necessitat d'emprar bombes de pressió.

➤ *Membrana semipermeable*

La naturalesa de la membrana és fonamental pels processos d'osmosi inversa. Una bona membrana compleix les següents característiques:

- Molt permeable a l'aigua i impermeable als soluts
- El menor gruix i volum possibles
- Resistent als valors de pressió als quals serà sotmesa
- Inerta químicament
- Resistent al lliscament
- Resistent a esforços mecànics

¹⁶ Segons les investigacions de R.Osantowski i A.Geinopolos, l'osmosi inversa és el mètode més econòmic de reutilització d'aigua a la indústria del paper i alimentària.

Nemerow N. L Dasgupta A. *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Ed. Díaz de Santos (1998).

Aquestes propietats garanteixen que serà capaç de ser sotmesa a totes les condicions del tractament i que no reaccionarà amb cap espècie química. A la vegada, un menor espai ocupat implica una instal·lació més petita, amb menor nombre de membranes i, consegüentment, més econòmica.

Cada membrana reté un tant per cent concret de cada espècie química, aquesta propietat s'anomena rebuig.

Es poden distingir diverses varietats de membrana que presenten diferents avantatges i inconvenients.

Membranes planes

Són el disseny més simple: rectangulars i aferrades a la resta del sistema per un marc. Tenen poca superfície útil, pel que s'acostumen a disposar un conjunt de membranes en sèrie per millorar l'efectivitat. En canvi, la separació entre membranes ofereix un rentat fàcil, cosa que les fa convenients en aigües de gran contaminació.

Membranes tubulars

Tenen forma cilíndrica i es recolzen sobre un tub de PVC. L'aigua entrant circula per dintre del tub; el permeat surt per fora i el retingut es queda dins. Són també de fàcil rentat, però continuen tenint un baix rendiment, pel que s'acostumen a utilitzar diversos tubs paral·lels. Són de fàcil fabricació.

Fibra buida

Les membranes de fibra buida són un conjunt de tubs de menys de $0.1\mu\text{m}$ de diàmetre, amb una fina membrana interior, que es troben dins d'un altre tub de plàstic protector.

L'aigua entra a pressió pels capil·lars dels tubs; el permeat els travessa i és emmagatzemat, les sals retingudes es desplacen progressivament als extrems del tub per acabar sent expulsades.

Són membranes amb alt grau d'eficiència, ja que poden tractar volums elevats d'aigua: la suma total dels cabals de cada capil·lar és elevada. A més, gràcies al gruix de les parets dels diversos tubs dels capil·lars poden suportar valors elevats de pressió.

A causa de la favorable relació entre l'espai de la instal·lació i el volum tractat, són un dels dos mètodes més econòmics (junt amb les membranes en espiral)

Membranes en espiral

Un conjunt de membranes amb forma rectangular unides a un cilindre (que recull el permeat) i separades entre elles (amb malles i materials impermeables) de manera que s'eviten obstruccions.

La disposició en espiral comprimeix l'espai necessari, abaratint la seva compra.

➤ *Composició*

Les membranes comercials més rellevants poden estar constituïdes per dos gran tipus de materials:

Membranes de poliamides aromàtiques

Són les que permeten el major cabal, necessiten bombes de pressió menors en comparació amb la resta. Per contra, són sensibles al clor. Actualment són les més utilitzades. En podem distingir dos subtipus segons la presència de grups sulfònics o carboxílics.

Membranes de (mono-, di-, tri-) acetat de cel·lulosa

La característica d'aquestes membranes que permet que encara estiguin al mercat és la seva resistència a concentracions de clor més elevades. D'aquesta manera es poden sotmetre a processos de desinfecció, pel que són útils en purificació d'aigües contaminades o salubres. Es van degenerant amb l'ús.

➤ *Components*

Un equip estàndard d'osmosi inversa consta de:

Pretractament

Per evitar el ràpid desgast de la membrana, l'aigua entrant se sotmet a un conjunt de prefiltres que tenen com a objectiu eliminar les impureses més importants (no deixen passar cossos de més de certs micròmetres o nanòmetres, segons el model). Al cap d'un cert període de temps, necessiten ser renovats. Destaquen:

Prefiltre de sediments > 5µm: Que permet disminuir el desgast de la membrana, allargant-ne la duració. Recanvi cada 6 mesos.

Prefiltre de carbó activat granular: Que elimina el clor. Adient per a resines de poliamides aromàtiques. Recanvi a l'any.

Bomba de pressió

Incrementa la pressió a la banda amb major concentració per invertir el procés d'osmosi.

Membrana semipermeable

Que ja hem tractat a la secció [anterior](#).

Postfiltrat

L'aigua resultant pot tornar a ser filtrada amb carbó actiu per eliminar possibles restes.

Dipòsit

L'aigua tractada s'emmagatzema fins el seu ús. L'estancament prolongat pot produir l'aparició de microorganismes.

➤ **Manteniment**

Progressivament, la membrana perd part de la seva efectivitat per l'acumulació de residus als seus porus: és necessari netejar-la.

En filtres petits, únicament s'utilitza el netejat amb aigua, que pot ser de dos tipus complementaris.

Contracorrent

Els porus de la membrana es netegen al fer-hi circular aigua filtrada en sentit invers al convencional (contracorrent) a una pressió 2.5 vegades major a la utilitzada durant l'ús habitual.

Co-corrent

Aigua filtrada que circula igual que el retintut, eliminant restes que podrien obstruir els porus. S'utilitza una pressió elevada.

Ús d'aire

Tanmateix, en grans instal·lacions, aquest sistema no és suficient ja que no neteja del tot la membrana. S'incorporen, a més dels fluxos d'aigua, corrents d'aire.

Agents químics

Per incrementar l'eficàcia del manteniment, s'afegeixen certs components químics substàncies a contracorrent (desinfectants, antical) per eliminar residus com el ferro o components orgànics. La regularitat de la seva aplicació depèn en gran mesura de les característiques de l'aigua, sent normalment mensual.

7.2.3 Mètodes elèctrics: *Electrodiàlisi - Electrodiàlisi inversa - Electrodesionització*

Podem definir l'electrodiàlisi com un procés de purificació de l'aigua basat en l'ús de membranes iòniques i camp elèctric.

Cal remarcar que a causa de la necessitat d'instal·lacions més grans i complexes, l'electrodiàlisi no es troba present a l'àmbit domèstic.

L'electrodiàlisi alterna membranes d'intercanvi iònic catióniques i aniòniques. Sota la influència d'un camp elèctric, els cations tendeixen a acumular-se al càtode, i el anions a l'ànode. A la vegada, la presència de membranes iòniques limita la mobilitat dels ions (ja que ions de càrrega positiva poden travessar una membrana d'intercanvi catiónica, però no una d'aniònica [Veure gràfic](#)). Amb això, els ions queden concentrats en diversos compartiments entre membranes. L'aigua no pot moure's entre les membranes, ja que aquestes són impermeables, sinó que surt en diversos compartiments que alternen entre altres i baixes concentracions iòniques. A més, es pot donar prioritat al pas de certs ions sobre altres

utilitzant membranes de diferent naturalesa. Les membranes són de la mateixa naturalesa que les resines d'intercanvi iònic.

A diferència de les resines o l'osmosi inversa, l'electrodiàlisi (ED) és un mètode que no elimina tots els ions amb un cicle de l'aparell. Hi ha moltes solucions: en grans instal·lacions s'acostuma a fer passar l'aigua per diversos sistemes de ED. En instal·lacions de menors dimensions, l'aigua passa varies vegades pel camp elèctric o bé s'instal·len diverses sèries de compartiments de resines.

De manera homòloga a l'osmosi inversa i la resta de sistemes amb membranes, és un sistema molt sensible a la contaminació orgànica, la qual no pot eliminar: per aquest motiu necessita també un pretractament per filtrar residus orgànics o de cert diàmetre. D'igual forma, calen complements de desinfecció, estabilització i neteja amb aire.

A més, també hi és present la polarització de la [concentració](#): Se solen instal·lar limitadors de cabal i creadors de turbulència per pal·liar-ne els efectes. Un corrent ràpid d'aigua també pot impedir la polarització.

El seu ús principal és l'obtenció d'aigua potable a partir d'aigua salobre o del mar. Resulta especialment econòmic en aigües de debil salinitat amb menys de 5000ppm de sòlids en solució. També té aplicacions en la producció d'aigües de calderes o d'ús industrial.

Tot i així, a partir dels 90, les millores de les membranes d'osmosi inversa han produït una disminució d'importància i quota de mercat d'aquest mètode de desionització.

➤ *Tipus d'electrodiàlisi*

Electrodiàlisi unidireccional

Els primers dos tipus d'electrodiàlisi són unidireccionals ja que no contemplen una inversió de la polaritat del càtode i l'ànode. Segons la posterior circulació de l'aigua sortint es poden dividir en:

Electrodiàlisi en lots

L'aigua circula contínuament d'un tanc de retenció a un sistema de membranes fins que s'aconsegueix la puresa necessària. L'aigua sobrant es fa tornar a circular per a una menor pèrdua.

Electrodiàlisi contínua

Mitjançant l'ús de dos agrupacions de membranes, s'aconsegueix que amb una única circulació de l'aigua, aquesta ja sigui òptima. L'aigua sobrant també es torna a fer circular per millorar el seu aprofitament.

El principal problema d'aquests dos sistemes resideix al tractament de la incrustació. Normalment s'afegeixen àcids (per tal de controlar la precipitació de carbonats), inhibidors de sulfat càlcic (CaSO_4) o s'utilitzen membranes permeables selectives: aquestes membranes

eviten el pas de certs ions i permeten el d'altres, ja que tenen caràcter selectiu. Combinant-les es pot evitar la formació de CaSO_4 de manera efectiva.

Les partícules col·loïdals tenen cert caràcter electronegatiu, tendeixen a acumular-se a les membranes anióniques. Els sistemes convencionals de neteja d'electrodiàlisi utilitzen un rentat amb gran cabal per eliminar aquests residus; certs sistemes comercials també fan servir el contrarentat per impedir la formació d'incrustacions.

Electrodiàlisi reversible

L'electrodiàlisi reversible (EDR) comença a sorgir als 60 com un intent d'evitar les incrustacions i contaminació sense l'addició de productes químics que atueixin la producció.

Per tal d'evitar-ho, s'inverteix la polaritat dels elèctrodes de 2 a 4 vegades cada hora. En produir-se el canvi, les reaccions també s'inverteixen: a l'ànode es forma hidrogen gas (H_2) i hidròxid (OH^-), aquest últim incrementa el pH de l'aigua, afavorint la precipitació de CaSO_4 . D'altra banda, al càtode es formen oxigen i diversos àcids que dissolen el sulfat càlcic acumulat durant la fase prèvia.

Com també es pot deduir, els compartiments de concentrat ara esdevindran de filtrat i els de filtrat, concentrat, pel que cal redirigir el sistema de sortida de l'aigua.

Els elèctrodes de la EDR es construeixen de materials inerts (per exemple, una coberta de platí), ja que l'ànode ha de ser sotmès a condicions corrosives (OH^-).

L'automatització del rentat evita l'aparició de residus o incrustacions així com també permet un rentat amb àcid dels elèctrodes sense l'ús d'agents químics (es formen àcids al càtode), el que suposa una avantatge econòmic i ecològic.

➤ Pretractament

L'aigua de l'ED i EDR necessita un menor pretractament que altres sistemes de membranes. Les mesures bàsiques de pretractament inclouen l'eliminació de sòlids en suspensió de més de $10\mu\text{m}$. Tractaments més avançats (que es duen a terme segons la qualitat de l'aigua original) també incorporen coagulació¹⁷, sedimentació i altres filtracions.

➤ Optimització dels recursos

Els processos de ED i EDR utilitzen tot un seguit de sistemes per optimitzar la quantitat d'aigua residual expulsada. Entre els més importants s'inclouen:

¹⁷ Coagulació: Els col·loïdes d'una suspensió es troben en suspensió, pel que diem que són estables. La seva càrrega negativa els repel·leix entre ells, el que dificulta la seva sedimentació. La coagulació busca trencar aquesta estabilitat amb productes químics per tal de formar agregats (espècies químiques que experimenten unions no covalents) de major grandària.

Reutilització del concentrat

El disseny de la instal·lació d'ED o EDR provoca que aproximadament la meitat de l'aigua utilitzada es torni concentrat i en conseqüència, sigui evacuada. Un sistema de reciclatge d'aquesta permet que sigui reutilitzada durant una major quantitat de temps. Després d'un cert temps, el concentrat és evacuat juntament amb una certa quantitat d'aigua no tractada per tal d'assolir les concentracions dictades per la [legislació](#).

Processos exclusius de l'EDR

Reutilització del corrent de l'elèctrode

La inversió de la polaritat dona a l'aigua característiques semblants a les de la no tractada. Els gasos produïts per la inversió es recullen i ventilen, i l'aigua s'expulsa. Aquesta aigua es pot reutilitzar, amb el conseqüent estalvi.

Reutilització de l'aigua fora de les especificacions

Durant la inversió de polaritat, els diversos compartiments canvien la seva naturalesa; el compartiments de concentrat esdevenen de desmineralitzat i viceversa. Tanmateix, aquesta inversió requereix una certa quantitat de temps per tal que l'aigua entrant travessi tot el sistema d'EDR. Durant aquest període, es pot retardar la inversió de les vàlvules de sortida; amb això, l'aigua no ha de ser evacuada, sinó que manté la seva salinitat mitjana a tractar. Així, es pot tornar a reutilitzar.

Procés d'inversió per fases

La inversió per fases es basa en el control de les vàlvules de sortida i entrada i la inversió individual de cada etapa d'elèctrodes.

En sistemes convencionals, una inversió simultània de tots els elèctrodes comporta una període de temps on cap etapa es troba operativa, pel que l'aigua sortint no té les especificacions adequades. En canvi, amb una inversió gradual, on cada elèctrode s'inverteix després d'un altre al cap d'un període de temps, s'aconsegueixen diversos beneficis: només una de les etapes no tracta l'aigua, pel que l'aigua fora de les especificacions es tracta a la resta. Això també proporciona una altra avantatge, el sistema pot funcionar de manera constant, sense necessitat i pauses, i conseqüentment, amb una millora productiva

Freqüència de la inversió

Normalment, la inversió de polaritat es produeix als 15 minuts. Certs sistemes, en canvi, permeten una major durada de cada cicle, pel que la periodicitat d'aigua fora de les especificacions també s'allarga, comportant un estalvi hidràulic.

Addició química

La salinitat de l'aigua tractada es mesura per la concentració de sulfat i carbonat càlcics. Amb l'objectiu d'evitar incrustacions, es pot optar per incorporar certes substàncies químiques (un antiincrustant per regular la concentració de sulfat càlcic; i àcid per la del carbonat càlcic). Gràcies a la reutilització del concentrat, la quantitat d'aquestes substàncies és petita. Sense aquest procés, la concentració de sulfat càlcic pot augmentar del 150 al 275%.

➤ *Post tractament*

L'aigua resultant del tractament d'ED o EDR passa una altra etapa de pretractament en funció del seu ús futur:

- Per aigües d'ús industrial, normalment s'incorporen més processos d'eliminació d'ions amb unitats d'intercanvi iònic; d'aquesta manera s'obté aigua amb alta puresa.
- Les normatives vigents tenen criteris més estrictes respecte l'aigua potable. És per això que s'agreguen processos de desinfecció i control de la corrosió¹⁸. Amb aquest propòsit, les plantes d'aigua potable amb ED/EDR solen contar amb un clorador, que dosifica l'addició de clor. En certs casos s'opta per l'ús de l'ozó (O₃), el qual proporciona una major independència del pH i un efecte bactericida major; però, per contra, certs problemes amb la matèria orgànica per la seva alta reactivitat.

➤ *Aplicacions*

Els sistemes d'ED i EDR només eliminen ions dissolts a l'aigua. Per tant, no són efectius davant d'elements orgànics contaminants sense càrrega o bacteris. És per això que aquests processos es combinen amb l'OR per tal d'obtenir aigua sortint amb menor concentració d'ions.

Podem distingir dos grans tipus d'aplicacions:

- Eliminació del Total de sòlids dissolts (TDS)
 - L'aplicació més usual. Destaca la flexibilitat de les plantes de tractament, que poden produir aigua de 500mg/L TDS a partir de valors de concentració tan diversos com 10000mg/L TDS i 3600mg/l TDS.
- Eliminació de contaminants inorgànics ionitzats.
 - Amb l'ED i EDR es poden eliminar certs problemes de l'aigua entrant, com ara elevades concentracions de nitrats, nitrits i seleni de la contaminació agrària. Aquests i altres són constituents inorgànics iònics contaminants que poden ser tractats. L'ED i EDR permeten reduir la concentració dels següents ions:
 - Crom, sodi, mercuri, clorur, coure, sulfat, urani, fluorur, nitrat, nitrit, ferro, seleni, calci, magnesi, bari, bicarbonat, cadmi i estronci.
 - La proporció d'eliminació d'aquests components és similar a la de TDS.

¹⁸ Corrosió: Reacció irreversible a causa del medi que degrada les propietats de cert material (normalment metalls).

➤ *Electrodesionització*

L'electrodesionització (EDI) és un procés utilitzat a la indústria per a l'obtenció d'aigua ultra pura. Va ser publicat per primera vegada el 1955 a la revista *Industrial & Engineering Chemistry*¹⁹.

Amb aquest procés, l'ús de camps elèctrics i resines es fusionen per donar un salt qualitatiu. De manera homòloga al mètode anterior, les càrregues són sotmeses a forces d'atracció/repulsió induïdes per camps elèctrics. Amb aquest nou plantejament, els compartiments per on circula l'aigua es troben plens de resina d'intercanvi iònic, el que augmenta l'eficàcia del procés.

L'EDI presenta un gran nombre d'avantatges vers la resta de mètodes; una purificació que pot arribar a la xifra de parts per milió o trilió de contaminants. No calen additius químics i posseeix una gran proporció de recuperació d'aigua (90%, i el 10% restant pot ser utilitzat per altres processos gràcies a unes concentracions no excessivament elevades). Es poden arribar a produir 250m³ d'aigua tractada per hora. A més, els camps elèctrics creen ions H⁺ OH⁻ que regeneren les resines durant el tractament. El que evita la regeneració d'àcids i la problemàtica de les incrustacions.

La presència de resines fa necessari un pretractament de l'aigua, ja que aquestes no es poden contrarestar, normalment s'apliquen mètodes d'osmosi inversa per evitar sòlids en suspensió.

Actualment, aquest mètode està substituint l'ús exclusiu de les resines.

7.2.4 *Inhibidors d'incrustació*

Els mètodes vistos fins ara es basaven en l'eliminació dels ions Ca²⁺ i Mg²⁺. Però existeix un altre mètode de tractament que simplement intenta evitar els seus efectes perjudicials, és la inhibició de la incrustació.

Com ja s'ha apuntat anteriorment, els carbonats càlcic i magnèsic precipiten per l'aportació d'energia (calor) o el mateix caràcter incrustant de l'aigua. Els inhibidors aporten l'energia necessària per la formació de cristalls, augmentant la seva forma i grandària de tal manera que no queden incrustats en la canonada, sinó que continuen fluïnt al llarg d'aquesta. Els cristalls tenen la mateixa composició química, però no la mateixa forma, que adquireix un caràcter no incrustant.

En forma d'ones electromagnètiques de determinada freqüència (en funció del cabal i les dimensions de la canonada), un conjunt de circuits integrats a l'inhibidor subministren un impuls electromagnètic dirigit cap al centre de la canonada que produeix la cristal·lització.

El inhibidors magnètics tenen tot un seguit d'avantatges:

W. R. Walters D. W. Weiser L. J. Marek *Concentration of Radioactive Aqueous Wastes. Electromigration Through Ion-Exchange Membranes*
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50541a027?prevSearch=marek&searchHistoryKey=>

- No alteren de l'aigua. A diferència de les resines, no s'allibera sodi que, en cas d'aigua amb excessiva duresa podria provocar un excés, no de cal, sinó de Na^+ .
- No sols evita les incrustacions, també les elimina. Els nous cristalls erosionen les antigues incrustacions. Conseqüentment, disminueix la corrosió.
- No necessita manteniment.

Per contra, el calci no s'elimina, es transforma. Els cristalls es troben dins de l'aigua, el que la fa poc atractiva al consum. A més, l'efecte no és permanent, pel que no és convenient utilitzar-lo en aigua emmagatzemada durant llargs períodes de temps.

Ja que no elimina la duresa, no s'aplica als mateixos contextos que la resta de processos, sinó en aquells que només suposen una circulació d'aigua i no el seu tractament :màquines de rentat, escalfadors d'aigua elèctrics o expenedors de begudes.

7.3 Projectes addicionals

L'estudi de l'evolució de l'efectivitat de diverses varietats de resines d'intercanvi iònic no va ser la primera idea plantejada. Prèviament vaig intentar dur a terme un seguit de propostes que, a causa de la seva nul·la efectivitat, vaig haver de descartar. Tanmateix, resulten especialment interessants i creatives, pel que és important explicar-les.

7.3.1 Els camps elèctrics com a eix central

Com s'explica als [processos elèctrics](#), la presència d'un camp elèctric provoca un moviment de càrregues dintre de l'aigua que finalment ocasiona la sortida de l'aigua en diversos compartiments desionitzats.

Utilitzant la càrrega elèctrica que caracteritza els ions de calci i magnesi, vaig idear un seguit de sistemes amb un denominador comú: el desplaçament de les càrregues cap a llocs concrets de diversos aparells.

7.3.2 Prototip de canonades amb alt voltatge

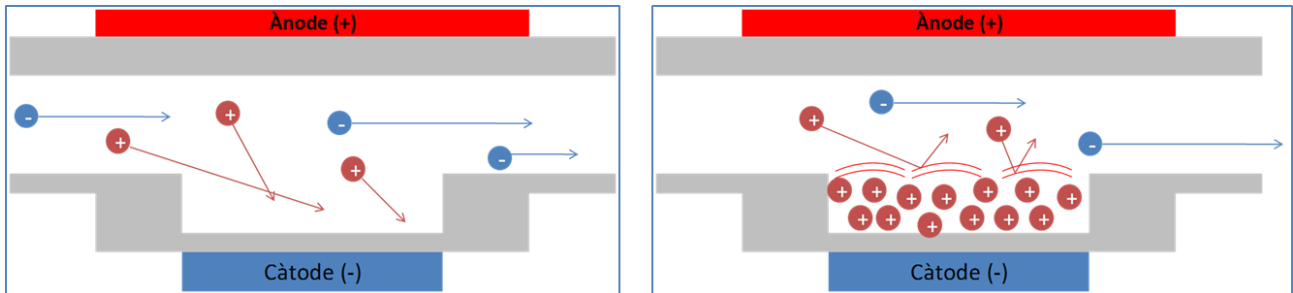
El primer prototip construït era el que més s'assemblava a un equip d'electrodiàlisi: els cations de l'aigua s'acumularien en una regió determinada d'una canonada: l'aigua circularia fins trobar-se amb un dipol produït per dues plaques paral·leles (elèctrodes): els ions de calci i magnesi s'acumularien al voltant del càtode i els anions farien el mateix entorn el càtode. D'aquesta manera, l'aigua sortint seria més tova.

Com es pot deduir, el principal desavantatge d'aquest mètode és la seva incapacitat de discriminació. No tan sols els ions de calci i magnesi disminueixen la seva concentració, també la resta de cations, fet que alteraria la composició de l'aigua per en paràmetres no desitjats. De totes maneres, la concentració d'altres cations és molt menor pel que la diferència quantitativa seria poc significant. En tot cas, una aigua sense cations té altres usos: com ara l'aplicació en aparells domèstics (rentadores, planxes, etc).

Ara bé, l'acumulació de càrregues positives (cations) en una regió de la canonada propera a un camp elèctric negatiu extern provocaria, al llarg del temps, una progressiva pèrdua de rendiment del descalcificador elèctric a causa de l'efecte d'apantallament entre el camp extern i el generat per les càrregues dels cations. És per això que es feia necessari idear una manera d'expulsar aquests ions. Per fer-ho, vaig projectar una regió més ampla de la canonada on s'hi acoblaria una aixeta; així, aquesta aigua carregada de cations s'expulsaria periòdicament, renovant el sistema sense haver d'interrompre la lliure circulació d'aigua. També es va considerar l'ús d'una membrana selectiva que retingués els ions evacuats i a la vegada permetés la reutilització de l'aigua. Tan sols cadria canviar aquesta membrana periòdicament. A causa de la seva complexitat (tant en el camp dels materials com el de muntatge), no es va portar a terme.

Un altre problema d'aquesta idea és la presència de càrregues negatives: aquestes també s'acumularien i podrien provocar efectes adversos. Per evitar-ho es va pensar en aplicar un

procediment homòleg a l'electrodiàlisi inversa: un canvi periòdic de polaritat dels elèctrodes durant el qual l'aigua sortint no estaria tractada. A causa dels resultats negatius dels diversos intents de portar a terme el projecte no es va poder posar en pràctica aquesta idea.



Animació 5 - Funcionament del prototip 1

Una vegada concebut de l'aparell, calia concretar-lo i construir-lo:

➤ Disseny

Obtenció de l'alta tensió

Al crear una diferència de potencial, les càrregues elèctriques es mouen del potencial més gran al més petit. Ara bé, per tal que aquesta diferència doni resultats, calen camps elèctrics molt elevats i separació entre elèctrodes molt petita (pocs mil·límetres). Per obtenir un alt voltatge vaig considerar dues alternatives:

Utilitzar un MAT

Aquest component, que es troba present als televisors actuals, crea una gran enorme diferència de potencial (de l'ordre de 10KV) per tal d'accelerar els electrons que, xocant contra la pantalla, permeten la visualització d'imatges. Tanmateix, es tracta d'un component que treballa també amb altes intensitats, pel que la seva manipulació pot arribar a ser molt perillosa.

Construir un multiplicador de tensió

Un multiplicador de tensió és un circuit que, mantenint la mateixa intensitat, augmenta la tensió entrant mitjançant un circuit de díodes i condensadors. El principal avantatge d'aquest mètode és la seva menor perillositat, ja que la intensitat és mínima.

A més, és un circuit de fàcil construcció i que pot ser reutilitzat com a ionitzador de l'aire.

Davant de les seves característiques favorables, vaig optar pel segon mètode.

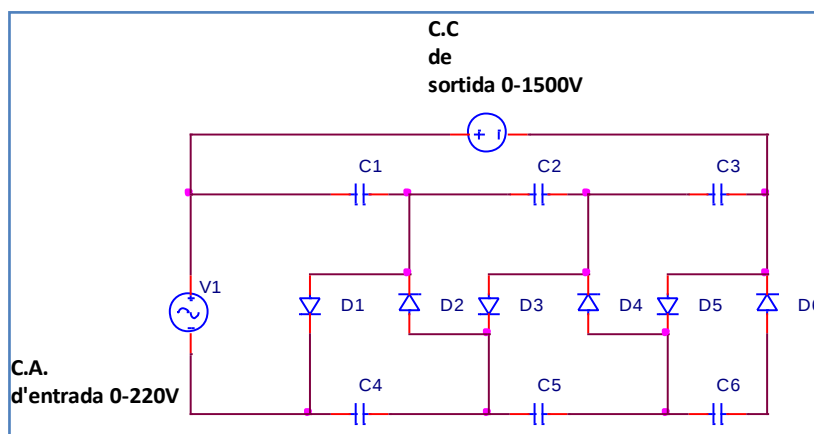
Esquema i funcionament elèctric

S'ha esmentat l'elecció d'un multiplicador de tensió, però és necessari conèixer el seu funcionament.

Com a conseqüència del corrent altern, el circuit canvia contínuament de polaritat. D'altra banda, el corrent no pot circular sempre per tot el circuit (a causa dels díodes, que limiten les direccions del pas de corrent).

Aquest fet provoca que a cada canvi de polaritat, s'acumuli tensió als condensadors, de manera que la tensió es multipliqui: se suma la tensió dels condensadors amb la del corrent.

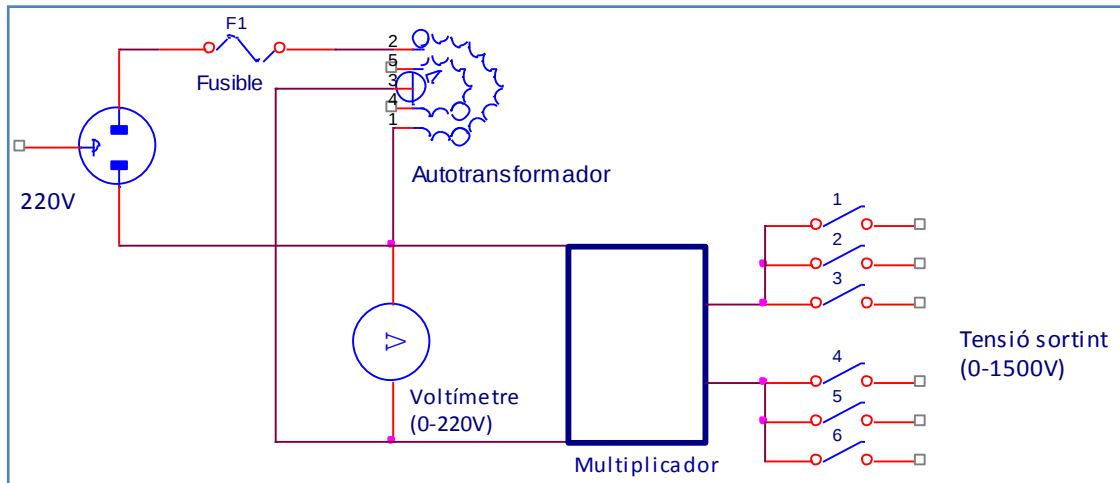
Crec que el funcionament d'aquest dispositiu és confús, i és difícil fer-ne una explicació escrita entenedora, el millor és visualitzar la següent animació:



Animació 6 - Funcionament del multiplicador

Tanmateix, la tensió final que proporciona l'ús d'aquest multiplicador és fixa, ja que la tensió entrant és constant. Si volia poder regular la tensió per tal d'estudiar-ne els seus efectes, calia integrar al circuit un altre component: un autotransformador variable.

D'aquesta manera, vaig dissenyar l'esquema elèctric de l'aparell. Per facilitar la seva denominació, vaig anomenar **caixa de controls** al conjunt de components que regulava el funcionament del prototip:



Esquema 3 - Circuit elèctric del prototip (caixa de controls)

Canonada

L'aigua havia de passar per una canonada amb elèctrodes al seu voltant. Per tenir una major versatilitat, els elèctrodes positius i negatius es dividirien en 3 plaques més petites. D'aquesta manera es podrien crear diferències de potencial en diferents parts de la canonada i mirar el impacte de les diverses combinacions sobre la duresa de l'aigua.

A més, calia que la part de la canonada on es trobaven els elèctrodes fos més ampla. Era impossible canviar la forma d'un tub de PVC amb els mitjans de què disposava, així que vaig optar per una solució més simple: l'aigua circularia per una canonada; aquesta canonada presentaria un tall a la part inferior en un segment en el qual es trobaria travessant una altra canonada de major diàmetre amb els extrems segellats: es a dir, en comptes de modificar la canonada vaig modificar el seu entorn.

També era necessari que es pogués expulsar l'aigua acumulada a la canonada de major diàmetre: per fer-ho caldria incorporar una aixeta addicional.

Per utilitzar un nom exacte (ja que la canonada consta de diversos complements com els elèctrodes o la canonada circumdant) vaig batejar aquesta part amb el nom de **suport**.

En resum: calia construir un multiplicador de tensió connectat a diverses plaques de coure disposades al voltant de dos canonades.

➤ Construcció

Materials

Caixa de control:

- 1) 8 condensadors
- 2) 7 díodes
- 3) Placa de circuit
- 4) Bornes de connexió a circuit imprès

- 5) Autotransformador variable
- 6) 6 interruptors
- 7) 6 bases femella de tipus *banana*.
- 8) Caixa de connexions
- 9) Placa de baquelita.
- 10) Base d'endoll
- 11) Portafusible amb fusible
- 12) Voltímetre
- 13) Tubs termoretràctils per a cable elèctric
- 14) Cable, cargols, rosques.

Suport

Canonada

- 1) Tub de PVC de 50mm
- 2) Tub de PVC de 32mm
- 3) Tub de PVC flexible de 20mm
- 4) 2 unions de tub de 20mm amb rosca femella de ½ polzada.
- 5) 2 taps de rosca de ½
- 6) 2 colzes de 90º de 20mm
- 7) 1 colze de per a tub de 32mm i rosca femella de 1 polzada.
- 8) Unió de tub de 32mm i rosca mascle de 1 polzada.
- 9) Transició femella-femella de 1 polzada
- 10) Reducció mascle-masclé de 1 x ¾ de polzada.
- 11) Aixeta de ¾ de polzada
- 12) Transició mascle-masclé de ¾ a ½.
- 13) Planxa de coure de dimensions mitjanes
- 14) Aixeta de PVC amb rosca de 1 polzada
- 15) Cintes de subjecció
- 16) Tubs termoretràctils per a cable elèctric
- 17) Tefló

- 18) Pegament per a PVC

Plaques

- 1) Planxa de coure
- 2) Cable
- 3) Bornes de connexió
- 4) Jacks de connexió
- 5) Cintes de subjecció
- 6) Cargols i torques

Eines

- 1) Minitaladre multiús²⁰
- 2) Serra
- 3) Soldador i estany.
- 4) Tornavís
- 5) Clau anglesa

Procediment

Caixa de control

1. Presentar els diversos elements en la caixa per planificar la seva incorporació.
2. Marcar i tallar els forats pertinents als elements que han de sobresortir: el voltímetre, els interruptors, l'autotransformador i la base per l'endoll. Tallar també un rectangle a un lateral destinat a les bornes de connexió.
3. Tallar un rectangle de baquelita d'un llarg i ample una mica més llarg que el rectangle efectuat anteriorment.
4. Realitzar 6 forats petits a la baquelita per on introduir les bases femelles de tipus *banana*.
5. Unir amb el lateral del forat rectangular mitjançant cargols.
6. Tallar també una altra una placa de baquelita d'uns 18x13cm.
7. Acoblar a la part inferior de la caixa amb cargols. Aquesta placa servirà com a base per integrar el circuit multiplicador.
8. Utilitzar la placa de circuit elèctric per reproduir-hi l'esquema del multiplicador de tensió. Després, integrar aquesta placa a la baquelita.
9. Obtenir una última placa de baquelita d'uns 5x6 cm amb un forat rectangular a la part central per on es pugui inserir l'endoll. Acoblar a un altre lateral amb cargols.
10. Col·locar els interruptors, el voltímetre, l'autotransformador i l'endoll.
11. Unir els diversos components segons l'esquema elèctric.

²⁰ No és imprescindible fer servir aquesta eina, encara que resulta molt pràctica: es pot suplir amb serres i taladres.

Per obtenir una visió més clara es poden fer servir cables vermells i blaus respectivament. Igualment, es pot indicar a quina polaritat i interruptor correspon cada base femella de tipus banana plastificant una nota amb les indicacions pertinents a la baquelita del lateral.

Suport

Canonada

1. Tallar 28cm del tub de 50mm
2. Tallar 48cm del tub de 32mm
3. Crear una obertura longitudinal de 90° de 20cm equidistant dels extrems.
4. Introduir el tub de 32cm dintre del de 50mm. Centrar-lo i enganxar-lo per la part superior (la que no té l'obertura).
5. Introduir uns 5cm del tub flexible de PVC de 20cm als 2 extrems de la part inferior del PVC de 50mm.
6. Segellar el tub amb cola de PVC i deixar assecar durant aproximadament un dia (cal gran quantitat de cola).
7. Acoblar 2 colzes de 90° als dos tubs flexibles de 20mm.
8. Subjectar-los a l'estructura principal amb 2 cintes de subjecció.
9. Unir cada colze amb les unions de 20mm i incloure els seus respectius taps de rosca de ½ polzada.
10. Acoblar el colze de 90° en un dels extrems del tub de 32mm
11. Unir l'aixeta de PVC de rosca de 32mm amb el colze anterior.
12. A l'altre extrem, acoblar, per ordre:
 - a. Unió de tub de 32mm i rosca mascle de 1 polzada.
 - b. Transició femella-femella de 1 polzada
 - c. Reducció mascle-mascle de 1 per ¾ de polzada.
 - d. Aixeta de ¾ de polzada
 - e. Transició mascle-mascle de ¾ a ½.

Plaques

1. Tallar 6 plaques de la planxa de coure de 5x8cm.
2. Fer un petit forat a una de les cantonades per tal d'introduir un cargol i una torca amb els que unir la placa amb els terminals de connexió dels cables que arriben des de la caixa de controls.
3. Donar a les plaques la forma curvilínia del tub de 50mm.
4. Disposar-les equidistants damunt del tub de 50mm de manera que hi hagi 3 a la part inferior i 3 a la superior.
5. Subjectar-les amb cintes de subjecció.
6. Preparar sis cables (3 vermells i 3 blaus per una visió més ràpida de la seva funció) d'aproximadament 1m.
 - a. Connectar les bornes de connexió a un dels seus extrems
 - b. Acoblar a l'altre extrem (el que es connectarà a la caixa de controls), el jack de connexió.
 - c. Es poden agrupar els cables utilitzant les cintes de subjecció.



Vídeo 3 - Construcció del prototip de canonades d'alt voltatge

➤ Revisió

Es va utilitzar un voltímetre de fins a 1500V per mesurar la tensió entrant i sortint. Els resultats obtinguts van arribar a un màxim d'uns 1400V.

Per començar, vaig decidir aplicar a la canonada la màxima tensió possible, és a dir els 1400V.

➤ Resultats

Després de la seva construcció, vaig passar a observar si el descalcificador construït complia la seva funció.

Es va analitzar la duresa de l'aigua abans i després de circular pel mecanisme. En tots els casos excepte en un (un malaurat error de mesura que va donar lloc a un fals optimisme), la duresa inicial era igual a la final.

➤ Conclusions

El descalcificador no va funcionar. Ara bé, per quina o quines raons? Considero que el concepte teòric de funcionament és correcte (les càrregues es mouen davant d'una diferència de potencial), així que poden haver succeït errors d'altre naturalesa:

- Error de càlcul
 - a. Es possible que el voltatge o la distància entre les plaques fos tan ínfim comparat amb els de l'electrodiàlisi que tan sols s'aconseguís una mínima disminució de la duresa.

- b. La velocitat de l'aigua també disminuïa la retenció d'ions, que tendien a marxar amb el corrent.

Malauradament és molt difícil trobar especificacions tècniques dels aparells d'electrodiàlisi (ja que són propietat d'empreses privades), pel que, tot i ser aquest motiu molt probable, no l'he pogut corroborar.

- Error de construcció
 - c. Els multiplicadors de tensió s'utilitzen fonamentalment per ionitzar l'aire. És possible que algun dels components que provocava la diferència de potencial no es comportés adequadament.

Sigui com sigui, aquesta experiència proporciona una deducció que en última instància que resulta prou interessant: els mètodes elèctrics requereixen d'uns mitjans molt majors que no pas els d'osmosi inversa o el intercanvi amb resines, que es poden aplicar més fàcilment a l'àmbit domèstic: aquest és un dels motius de la seva pèrdua d'importància.

7.3.3 Prototip de "separador" de duresa

La idea dels camps elèctrics va perdre força amb el fracàs del primer projecte, però tot i així no em vaig donar per vençut.

Vaig considerar que el principal problema que presentava el descalcificador inicial era la limitació pel temps, és a dir: els cations havien d'ésser retinguts abans de marxar amb el corrent. Per tant, si dissenyava un sistema més estàtic podria evitar aquesta problemàtica. Igualment, deixant en funcionament el nou prototip durant una elevada quantitat de temps podria compensar la possible poca efectivitat deguda a un voltatge comparativament petit i la separació entre plaques excessiva.

En aquest nou sistema l'aigua havia de romandre quieta. Unes plaques situades als extrems d'un recipient crearien una distribució de càrrega. L'aigua sortint ho faria a la zona amb menor concentració de cations i, conseqüentment, més tova.

➤ Disseny

Es pot apreciar que aquest nou intent de descalcificador és molt més senzill que l'anterior. Només cal un recipient de mida mitjana, dues plaques de coure, afegir una aixeta i utilitzar la caixa de controls de l'anterior intent de descalcificador.

➤ Construcció

Materials

- 1) Recipient de plàstic d'uns 21x13x10
- 2) Arandela de goma
- 3) Rosca per acoblar a una aixeta de ½ polzada..

- 4) Aixeta de ½ polzada.
- 5) Placa gran de coure.
- 6) Caixa de controls

Eines

- 1) Minitaladre multiús.
- 2) Clau anglesa

Procediment

1. Fer un forat a la part inferior del recipient on acoblar la rosca amb la seva aixeta prèviament enroscada. A la vegada que es col·loca la rosca, incorporar també l'arandela de goma a l'interior del recipient.
2. Tallar dues plaques de coure de manera que ocupin la major part dels dos laterals amb més superfície del recipient. Cal tenir en compte que unes de les plaques haurà d'adaptar-se al contorn de l'aixeta.
3. Fixar les plaques amb goma elàstica.
4. Unir les plaques a la caixa de controls pel mateix procediment que amb la canonada.

➤ *Disseny 2*

També es va voler provar un altre disseny on l'aixeta estigués darrere d'una de les plaques. Així potser es contribuiria a una major repulsió..

En aquest cas, els elèctrodes havia d'estar en contacte amb l'aigua, pel que era es va fer més convenient utilitzar una reixeta metàl·lica en comptes de les plaques.

➤ *Resultats*

La duresa final va resultar sempre igual a l'inicial en tots els intervals de temps utilitzats (fins a 12h).

➤ *Conclusions*

L'aparell tampoc va funcionar. En aquest cas es va atribuir també a una capacitat molt petita comparada amb l'electrodiàlisi estàndard. Aquesta diferència es començava a corroborar com a insalvable.

D'altra banda, es va considerar un nou factor: la pressió. Era possible que la pressió de l'aigua també contribuís a una distribució homogènia de les partícules, inclosos els ions, que així tindrien encara més dificultats per concentrar-se en certes regions.

En resum, un altre mètode fallit que no feia més que corroborar l'actual pèrdua d'importància dels mètodes elèctrics.

7.3.4 Idees no dutes a terme

Abans de decidir-me per l'alternativa de les resines, vaig considerar i iniciar altres projectes pràctics sobre la descalcificació. Aquests projectes van ser suspesos una vegada corroborada l'efectivitat de les resines i la seva viabilitat com a treball de recerca. Encara així, crec que és convenient exposar aquestes idees aquí per tal que puguin servir com a mostra de les variades idees pensades:

➤ *Utilització d'un MAT*

Finalment, amb motiu de la curiositat per comparar si hi havia cap diferència significativa amb els procediments duts a terme fins llavors, vaig començar a considerar seriosament la possibilitat de fer servir un MAT en comptes d'un multiplicador de tensió (és possible que la poca intensitat d'aquest fos un dels factors del seu fracàs).

Com és evident, utilitzar aquest dispositiu requereix de major preparació i mitjans, els quals no es van buscar després d'optar per les resines.

➤ *Ús de camps elèctrics*

Vaig considerar diverses maneres d'utilitzar els camps elèctrics.

1. Fer un estudi del funcionament inhibidor magnètic comercial
 - Malauradament l'únic inhibidor comercial que vaig obtenir es limitava a dos imans amb un suport de plàstic, massa rudimentari.
 - No vaig poder determinar cap mètode viable per quantificar la formació de cristalls de carbonat de calci.
2. Tractar d'imitar el seu funcionament mitjançant bobines de deflexió d'un tub de raigs catòdics d'un televisor.
 - Aquest component s'utilitza per desviar el feix d'electrons al tub de raigs catòdics. Això permet la formació de la imatge.
 - El feix d'electrons experimenta primerament una acceleració cap a la pantalla a causa de l'elevada tensió produïda pel MAT. Posteriorment, cal desviar aquest feix per tal que es distribueixi per tota la pantalla: això s'aconsegueix amb els potents camps magnètics de les bobines de deflexió.
 - Amb aquest component es podrien aconseguir dos fites
 1. Aportar l'energia suficient per provocar la cristallització del carbonat de calci de alterant la seva estructura tridimensional, de manera que no s'adherís a les parets.
 2. Apropar-se encara més a la funció inicial de les bobines i fer-les servir simplement per desviar un feix d'ions que es mou per un corrent d'aigua, de manera que els ions es concentrin en determinades regions.

7.3.5 Conclusió final

Necessitava un projecte fiable i segur, un projecte en el qual el temps dedicat servís per obtenir una conclusió final interessant. Finalment vaig optar per les resines.

7.4 Treball teòric

Limitar-me a exposar ordenadament la informació adquirida no era suficient. Volia tenir informació de primera mà, d'algú versat en la matèria. Aquesta informació potser em podria ajudar i orientar en la part pràctica del treball. Havia, per tant, de fer una entrevista a un expert.

7.4.1 Entrevista

➤ *Qüestionari sobre la descalcificació*

Per obtenir més informació sobre el tractament d'aigües, vaig decidir de donar un petit qüestionari a persones vinculades amb aquest camp. Trobar persones disposades a contestar les meves preguntes va ser difícil, però finalment, el senyor Josep Maria Sabaté Sans, de *LyondellBasell*, va accedir-hi. No puc mostrar el qüestionari sense abans haver tornat a agrair la seva amabilitat.

LyondellBasell (fusió de les empreses *Lyondell* i *Basell*) és una de les companyies químiques més importants de polímers, productes petroquímics i combustibles d'arreu del món. Destaca en la producció de poliolefines²¹, òxid de propilè i altres.

²¹ Poliolefines: Polímers formats per olefines, també anomenats alquens: hidrocarburs amb un mínim d'un doble enllaç C-C, com ara el propilè.

Qüestionari sobre la descalcificació

Primerament voldria agrair-li el fet de dedicar part del seu temps a respondre a aquest petit qüestionari.

Quin és el seu nom?

Josep Maria Sabaté Sans

Quina és la seva feina a *LyondellBasell*?

Responsable del Control de Qualitat de la planta de polipropilè.

Quins mètodes de descalcificació utilitza *LyondellBasell*?

Basell en els seus dos centres (*Novelen* i *Taqsa*) tenia fins fa poc dues plantes d'obtenció d'aigua desmineralitzada (desionitzada), actualment l'aigua ens la subministra la companyia de serveis *Tarragona Power*.

El mètode emprat amb anterioritat a les nostres plantes de tractament d'aigües era la de captació d'anions i cations per columnes de resines aniòniques i catiòniques.

Quina importància tenen les resines a la seva companyia?

Actualment les nostres plantes no utilitzen resines per desmineralitzar aigües. El que sí que tenim són columnes per filtrar l'aigua industrial de les torres de refrigeració (filtres d'arena²² / 3 torres). També tenim uns filtres de ceràmica porosa per tal de separar i poder extreure l'aigua que porta el gas propilè, que és la nostra principal matèria primera.

Quins tipus de resines utilitzaven?

Les resines eren catiòniques i aniòniques les quals captaven diferents elements segons la polaritat: capten o rebutgen la molècula en funció de la seva càrrega positiva o negativa.

Quanta duresa poden arribar a treure? Cada quan es fa necessari aplicar la salmorra? I el recanvi total de les resines?

Les columnes de resines elaboren aigua desmineralitzada (no destil·lada) i la medició més ràpida de les sals dissoltes és la conductivitat. S'accepta com a bo un valor menor de 2microSiemens(μS) $\cdot \text{cm}^{-1}$ ²³, el qual indica una presència de sals menor a 1ppm. Quan no es pot baixar fins a aquests valors de conductivitat és el moment de regenerar-la. Ara bé, la periodicitat dependrà de la duresa en sals de l'aigua utilitzada: no és el mateix l'aigua de l'Ebre o de mina (menys duresa) o la dels pous (Aitosa) del Camp de Tarragona, el qual està situat en un espai de gran presència calcària (carbonat de calci).

²² Filtres d'arena: Tancs amb una capa d'arena de 1.5m a 45cm. Les partícules més grans queden retingudes a les cavitats dels grans de sorra, de manera que l'aigua sortint resta exempta de grans partícules.

²³ La conductivitat és l'invers de la resistivitat, per tant: $2\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} = 2\mu\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

El recanvi total de les resines no es dona quasi mai a no ser que per una mala operació de regeneració o per un trencament del circuit es produís una pèrdua considerable de les mateixes. El que sí que es fa és afegir resines de manera puntual, ja que durant el procés es donen pèrdues, desgast i arrossegament d'una petita part de resina.

En què es diferencien les resines d'ús industrial de les domèstiques?

Cal pensar que les domèstiques tenen un control més exhaustiu quant a qualitat i seguretat de la seva regeneració, i que aquesta regeneració sols es fa amb salmorra: a la indústria per regenerar també s'utilitza com a complement l'àcid clorhídric (HCl 50%) i la Sosa Càustica (NaOH 50%).

Els seus mètodes de descalcificació, especialment les resines, han evolucionat a través del temps? En cas afirmatiu: com?

Les resines se segueixen utilitzant. Ara bé, també s'ha introduït amb molta força l'osmosi. En plantes de cogeneració²⁴ d'electricitat també s'utilitzen els gasos de sortida de turbina (molt calents) per produir vapor i escalfar calderes per fer aigua destil·lada amb el mètode tradicional d'evaporar i refredar.

Creu que les noves alternatives podrien substituïr les resines? Per què?

La tècnica de l'osmosi pot guanyar llocs a la de resines ja que en la regeneració de columnes de resines s'originen una quantitat de residus líquids en el rentat que després necessiten un segon tractament en bases de neutralització i decantació.

Moltes gràcies.

➤ Anàlisi

Aquesta entrevista té una doble conclusió:

Per una banda confirmen les afirmacions fetes al fonament teòric. Les resines estan perdent terreny davant de l'osmosi, que no deixa tants residus líquids que requereixin un posterior tractament.

Igualment, ofereix una orientació davant de la part pràctica del treball: les resines de l'àmbit domèstic passen per uns majors controls de qualitat, ja que estan destinades al consum humà. Això indica que aquestes resines haurien de ser més fiables i permetre que la majoria de l'aigua utilitzada fos idònia pel seu ús. Per tant, quan estudiï els resultats de la part pràctica del treball puc esperar menys fugues puntuals de duresa i, possiblement, una corba d'evolució lleugerament diferent amb el temps.

²⁴Cogeneració: Procediment que permet obtenir energi de la calor i l'electricitat a la vegada, el que el fa més eficient.

7.4.2 Comparativa d'aigües

Abans de començar les anàlisis de la duresa de l'aigua, vaig pensar que seria bona idea consultar els informes oficials sobre la composició de l'aigua de Reus: així tindria uns valors amb els que comprovar els resultats de les meves proves i corroborar que fossin correctes (l'aigua no podia ser tampoc excessivament diferent).

Durant la recerca d'informació de l'aigua de Reus, vaig poder consultar un informe de la OCU²⁵, on s'establia una comparativa entre les diferents aigües d'Espanya. Aquesta comparativa posava en relleu grans contrastos entre diverses regions.

A partir d'aquell moment vaig creure que seria interessant fer una comparativa pròpia entre Reus i altres ciutats espanyoles amb qualitat d'aigua diversa, així com alguna altra ciutat important del món: podria determinar si les diferències exposades per l'OCU existien realment i també podria comparar la situació de l'aigua a Espanya amb la d'un altre lloc.

➤ *Recopilació d'informació*

No totes les administracions presenten la mateixa facilitat per obtenir informes sobre la composició de la seva aigua. Teòricament, existeix una entitat anomenada SINAC (*Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo*), encarregada de proporcionar tota mena d'informació relativa a l'aigua pel consum. Malauradament, la disponibilitat d'informació al seu domini web és molt escassa i poc concreta. Per tant, en lloc de decidir quines analítiques volia, vaig haver d'escollir entre aquelles a les quals tenia accés.

L'analítica de Reus era primordial, ja que seria l'eix de la comparativa: vaig haver de demanar una analítica a **Aigües de Reus empresa municipal S.A.**, que molt amablement me la va concedir.

Posteriorment vaig analitzar els resultats de l'informe de l'OCU per trobar 2 ciutats amb grans diferències en la qualitat de l'aigua. De la mateixa manera, aquestes ciutats havien de facilitar informació de la seva aigua via web. Finalment em vaig decidir per utilitzar l'aigua de Bilbao i la de Saragossa.

Per últim, havia d'escollir una ciutat estrangera. Havia d'ésser una ciutat coneguda i famosa, ja que així la comparativa resultaria més interessant i propera. Després de considerar diverses opcions (com ara Londres) em vaig decantar per l'aigua de Nova York (NY).

Es cas de voler consultar les analítiques completes es poden veure en els annexos (la de [Reus](#)) o per les pàgines web de la [bibliografia](#).

²⁵ Organización Consumidores y Usuarios

<http://www.ocu.org/suministros-y-energia/un-analisis-de-la-ocu-detecta-agua-no-potable-en-las-muestras-recogidas-en-6-ciudades-espanolas-s253331.htm>

➤ *Paràmetres comparats*

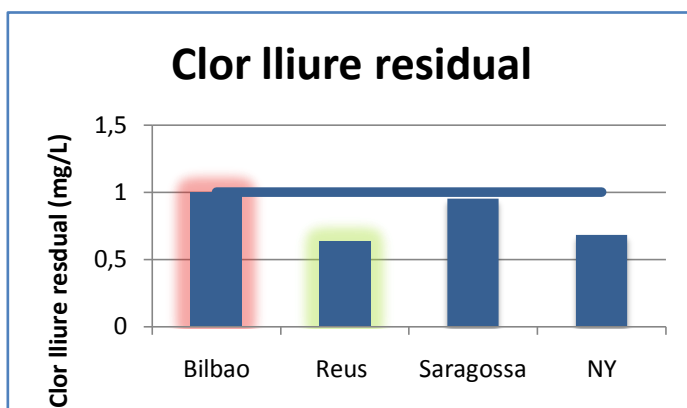
Els paràmetres analitzats a les diverses anàlisis eren variats i no sempre els mateixos. Tanmateix, hi havia un conjunt de paràmetres comuns en tots (els més usuals) que podien ser-me útils per a la comparativa:

Les línies horitzontals dels gràfics representen el valor màxim estipulat per la normativa espanyola, recollida al *Real Decreto 140/2003*. Si no n'hi ha, significa que la normativa no estableix cap valor de referència.

Clor lliure residual

El clor és un desinfectant que s'utilitza de manera molt extensa pel tractament d'aigües. És un producte barat i efectiu; per contra, el clor pot tenir efectes adversos sobre el gust i l'olor de l'aigua.

Anomenen clor lliure residual a aquella quantitat de clor que queda lliure a l'aigua, és a dir, que no es combina ni es redueix amb altres components. Aquest tipus de clor apareix quan s'ha afegit una quantitat de clor el suficientment gran.



Com es pot veure, l'aigua de Reus i NY són les que en presenten en una menor quantitat. Per contra, la de Bilbao és la que en té més, seguida de prop per l'aigua de Saragossa. Aquestes dues aigües es troben molt a prop del màxim establert per la llei.

El fet planteja dues possibles deduccions

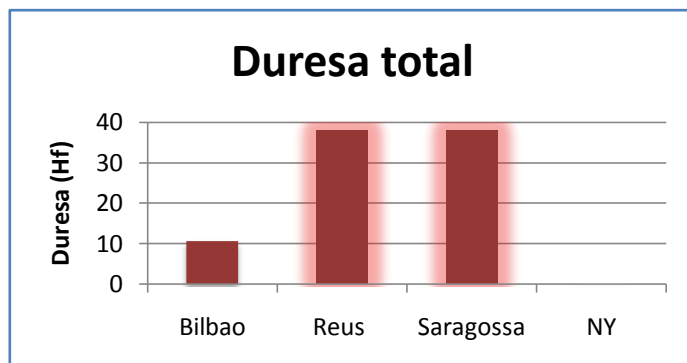
Gràfic 21 - Comparativa del clor lliure residual

- Les aigües de Bilbao i Saragossa són més propenses a patir contaminació biològica, pel que necessiten una major quantitat de clor.
- El tractament de les aigües de Bilbao i Saragossa vol oferir una major qualitat, pel que afegeix més clor a l'aigua per tal d'evitar l'aparició d'organismes perillosos.

Duresa

A la duresa podem observar unes grans diferències.

- L'aigua de Reus i Saragossa té una duresa molt elevada. Això és a causa de l'aigua de la zona (Ebre i Camp de Tarragona), típicament dura.
- D'altra banda, la de Bilbao i NY és molt més baixa (la de Bilbao està al límit de l'aigua tova (0-10^oHf), la de NY és totalment tova (quasi ni en té)).



Gràfic 22 - Comparativa de la duresa

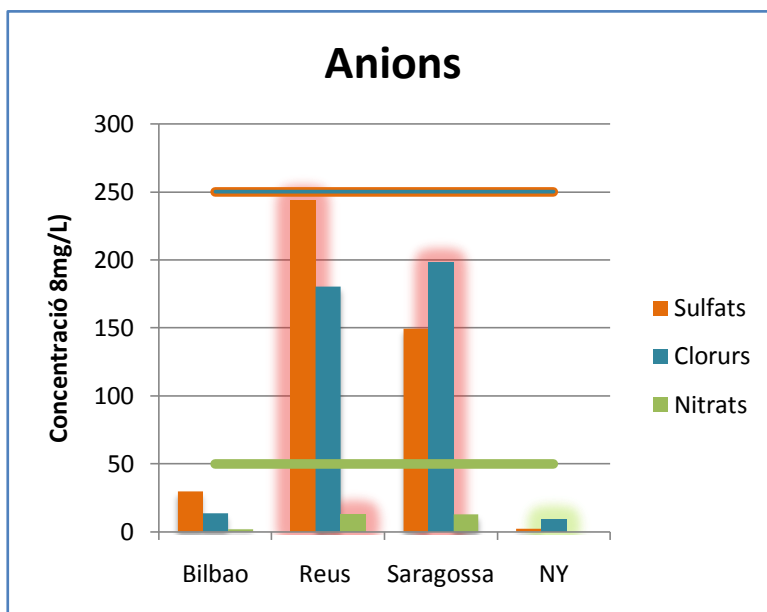
De fet, cap de les aigües té la duresa ideal pel consum (20^oHf): o bé són massa dures o massa toves. Sigui com sigui, l'aigua que més s'hi apropa és la de Bilbao.

Ions

Sulfats

El sulfat ($-\text{SO}_4$) es troba present en totes les aigües, ja sigui per contaminació industrial o compostos amb sofre al sòl.

El sulfat té un efecte laxant quan es combina amb el magnesi i el sodi. Igualment, és utilitzat per certs bacteris anaerobis, que produeixen sulfur d'hidrogen, que dona a l'aigua un olor desagradable.



Gràfic 23 - Comparativa d'anions

Les poblacions s'acaben acostumant a alts nivells de sulfat en l'aigua, però no és recomanable que sigui consumida per infants. Les canonades també es veuen afectades per altes concentracions de sulfat.

L'aigua de Reus és la que té més sulfats amb diferència (s'apropa al màxim permès), seguida de la de Saragossa. Com s'observa en el gràfic, el nivell de sofre en NY i Bilbao és molt menor.

Clorurs

Els clorurs, igual que la majoria de paràmetres, són més elevats a Reus i Saragossa.

Nitrats

Els nitrats ($-\text{NO}_3$) són un agent contaminant perillós per dos motius:

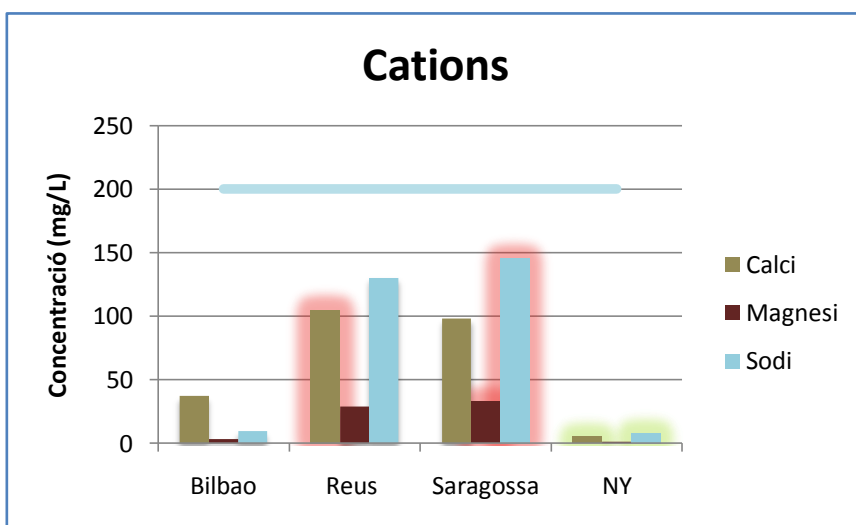
- Normalment indiquen agents contaminants més greus: bacteries, pesticides. Un excés de nitrats pot provocar metahemoglobinèmia, una malaltia vinculada a la manca d'oxigen. Les nadons es veuen afectats a nivells menors de nitrats. Els nitrats de l'aigua solen provenir de l'adob i fertilitzats de l'agricultura.

Com es pot veure en la comparativa, cap de les aigües s'apropa al nivell màxim.

De la mateixa manera que la resta de paràmetres, NY i Bilbao són les que menys nitrats presenten, al contrari que Saragossa i Reus. Si analitzem les activitats de cada zona, viem que els nivells alts de nitrats corresponen a zones amb cultius i, nivells baixos, a zones més industrials.

Sodi

El sodi és menor en l'aigua de NY i Bilbao, igual que la resta de cations.



Gràfic 24 - Comparativa de cations

➤ Conclusions

Totes aquestes dades em porten a una conclusió fonamental:

- La qualitat de l'aigua de Bilbao i NY és molt superior a la de Saragossa i Reus. Això confirma els resultats de l'informe de l'OCU.

Nogensmenys, encara puc especular sobre el motius d'aquesta diferència tan notable de qualitat

- La qualitat de l'aigua inicial és diferent

Nova York es troba enmig del riu *Hudson*, Bilbao disposa de la *Ría de Bilbao*, on conflueixen el *Nervión* i l'*Ibaizábal*, Saragossa es troba a prop de l'Ebre i Reus disposa de barrancs i aqüífers.

Això doncs es podria pensar que aquestes diferències corresponen a trets característics de cada aigua (així, l'aigua del Hudson seria més tova que les altres, o la de l'Ebre tindria més sodi). Aquesta deducció es veu recolzada pel fet que l'aigua de Reus i Saragossa provenen de l'Ebre, pel que han de ser molt semblants, cosa que es compleix.

- Segons això, podria dir que l'aigua de l'Ebre és pitjor que la del riu *Hudson* i la *Ría de Bilbao*.

Tanmateix, les aigües de Saragossa i Reus, d'una pitjor qualitat, també presenten diferències entre elles. Aquest fet em porta a la següent conclusió

- La qualitat dels tractaments és diferent

Aquest és un fet evident, però si analitzem cada paràmetre per separat veiem que cada l'administració no controla igual tots els paràmetres:

- Els sulfats són molt majors a l'aigua de Reus que no a la resta
- El sodi i els clorurs són més elevats a Saragossa.

Aquestes fets posen en relleu l'heterogeneïtat de les aigües dels diversos indrets d'Espanya,

De la mateixa manera, és possible que l'administració de Bilbao i Nova York posi més èmfasi en la qualitat de les seves aigües: això es veuria reflectit en els millors valors dels seus paràmetres.

Podria semblar que l'aigua de l'aixeta és semblant a tot arreu, però hi ha moltes més diferències de les que imaginem.

7.5 Documentació addicional

7.5.1 Marc legislatiu a Espanya

Els criteris d'acceptabilitat de l'aigua destinada al consum humà en l'Estat espanyol es troben recollits en el Real Decreto 140/2003 del dia 7 de febrer de 2003:

Paràmetres microbiològics

1. Escherichia coli	0 UFC en 100 ml
2. Enterococo	0 UFC en 100 ml
3. Clostridium perfringens (<i>incloses espores</i>)	0 UFC en 100 ml 1 i 2

Paràmetres químics

4. Antimoni	5,0 µg/l
5. Arsènic	10 µg/l
6. Benzè	1,0 µg/l
7. Benzè(a)pirè	0,010 µg/l
8. Bor	1,0 mg/l
9. Bromat	
A partir de 01/01/2009	10 µg/l
De 01/01/2004 fins a 31/12/2008	25 µg/l
10. Cadmi	5,0 lg/l
11. Cianur	50 µg/l
12. Coure	2,0 mg/l
13. Crom	50 µg/l
14. 1,2-Dicloroetà	3,0 µg/l
15. Fluorur	1,5 mg/l
16. Hidrocarburs Policíclics	
Aromàtics (HPA)	0,10 µg/l
Suma de:	
Benzo(b)fluorantè	µg/l
Benzo(ghi)perilè	µg/l
Benzo(k)fluorantè	µg/l
Indeno(1,2,3-cd)pirè	µg/l
17. Mercuri	1,0 µg/l
18. Microcistina	1µg/l
19. Níquel	20µg/l
20. Nitrat	50 mg/l
21. Nitrits: 3 i 4	
Red de distribució	0,5 mg/l
En la sortida de l'ETAP/dipòsit	0,1 mg/l
22. Total de plaguicides	0,50 µg/l
23. Plaguicida individual	0,10 µg/l
Excepte per als casos de:	
Aldrí	0,03 µg/l
Dieldrí	0,03 µg/l
Heptaclor	0,03 µg/l
Heptaclor epòxid	0,03 µg/l
24. Plom:	
A partir de 01/01/2014	10 µg/l
De 01/01/2004 fins a 31/12/2013	25 µg/l

25. Seleni	10 µg/l
26. Trihalometans (THMs):	
Suma de:	
A partir de 01/01/2009	100 µg/l
De 01/01/2004 a 31/12/2008	150 µg/l
Bromodiclorometà	µg/l
Bromoform	µg/l
Cloroform	µg/l
Dibromoclorometà	µg/l
27. Tricloroetè + Tetracloroetè 1	10µg/l
Tetracloroetè	µg/l
Tricloroetè	µg/l

Paràmetres químics controlats segons les especificacions del producte²⁶

28. Acrilamida	0,10µg/l
29. Epiclorhidrina	0,10 µg/l
30. Clorur de vinil	0,50 µg/l

Paràmetres indicadors

31. Bacteris coliforms	0 UFC en 100 ml
32. Recompte de colònies a 22°C	
A la sortida de ETAP	100 UFC en 1 ml
En xarxa de distribució	Sense canvis anòmals
33. Alumini	200 µg/l
34. Amoni	0,50 mg/l
35. Carboni orgànic total	Sense canvis anòmals
36. Clor combinat residual	2,0 mg/l
37. Clor lliure residual	1,0 mg/l
38. Clorur	250 mg/l
39. Color	15 mg/l Pt/Co
40. Conductivitat	500 µS/cm ⁻¹ a 20°C 5
41. Ferro	200 µg/l
42. Manganès	50 µg/l
43. Olor	3 a 25 °C Índex de dilució
44. Oxidabilitat	5,0 mg O ₂ /l
45. pH:	
Valor paramètric mínim	6.5
Valor paramètric màxim	9.5
46. Sabor	3 a 25 °C Índex de dilució
47. Sodi	200 mg/l
48. Sulfat	250 mg/l
49. Terbolesa	
A la sortida de ETAP i/o depòsit	1 UNF
En xarxa de distribució	5 UNF

Radioactivitat

50. Dosi indicativa total	0,10 mSv/any
51. Triti	100 Bq/l
52. Activitat α total	0,1 Bq/l
53. Activitat β total	1 Bq/l 2

²⁶ Agents produïts per empreses que utilitzen certs tipus materials.

7.5.2 Anàlisi de l'aigua de Reus



J. Anselm Clavé, 23 - 43201 REUS
Tel.: 977 127 219
FAX: 977 342 937
administracio@gaiasa.es

INFORME DE RESULTATS ANALÍTICS

AIGÜES DE REUS EMPRESA MUNICIPAL SA

Plaça de les Aigües 1

43201 - Reus

Mostra: E / AC58017-08
Referència client: Anàlisi complet - Font Pavelló
Data i hora de mostreig: 03/03/2008
Data i hora de recepció mostra: 03/03/2008
Data inici anàlisi: 03/03/2008
Data final anàlisi: 18/03/2008
Data informe: 04/07/2008
Referència comanda:
Referència oferta: 035/AQ05023/001
Mostrejador: Fiñana
Procedència: Font Pavelló Olímpic

DETERMINACIÓ	RESULTATS	UNITATS	ESPECIFICACIÓ
Clor lliure residual	0,63	mg/l	1,0
Clor total	0,77	mg/l	
Clor combinat residual	0,14	mg/l	2,0
Conductivitat a 20°C	1246	uS /cm a 20 °C	2500
pH	7,88	Unitats	6,5 - 9,5
Nitrits	<0,01	mg/l	0,1
Oxidabilitat al permanganat	1,1	mg O ₂ /l	5
Terbolesa	0,21	NTU	5
Calci	105	mg/l	
Color	5	mg/l Pt/Co	15
Benzè	<1,0	ug/l	1,0
Benzo (a) pirè	<0,002	ug/l	0,01
Bor	<0,1	mg/l	1
Bromats	<10,0	ug/l	25
Cianurs totals	<10	ug/l	50
1,2-Dicloroetà	<3,0	ug/l	3,0
Carboni Orgànic Total (TOC)	15,0	mg/l	
Duresa total	380,3	mg/l	
Níquel	<10	ug/l	
Clorurs	180	mg/l	250
Nitrats	13,0	mg/l	50

Pàgina 1 de 4

FMG 360-03



Registre Mercantil de Tarragona, en el Tom 955, secció de societats, foli 68, full núm. 1-7449 inscripció 1ª
NIF A-43379441. Registre d'Entitats Locals núm. 4312335062





J. Anselm Clavé, 23 - 43201 REUS
Tel.: 977 127 219
FAX: 977 342 937
administracio@gaia.es

INFORME DE RESULTATS ANALÍTICS

DETERMINACIÓ	RESULTATS	UNITATS	ESPECIFICACIÓ
Fluorurs	0,25	mg/l	1,5
Sulfats	244	mg/l	250
Alumini	<10	ug/l	200
Antimoni	<5	ug/l	
Arsènic	<10	ug/l	
Cadmi	<5	ug/l	
Coure	<10	ug/l	2000
Crom total	<10	ug/l	50
Mercuri	<1	ug/l	1,0
Plom	<10	ug/l	25
Sodi	130,0	mg/l	200
Potassi	7,10	mg/l	
Manganès	<10	ug/l	50
Seleni	<5	ug/l	
Ferro total	<10	ug/l	200
Carbonats	0,0	mg/l	
Bicarbonats	237,9	mg/l	
Olor TON	3	Index dilucio a 25 cº	3
Gust TFN	3	Index dilucio a 25 cº	3
Amoni	<0,05	mg/l	0,5
Magnesi	28,7	mg/l	
Escherichia coli	Absència	ufc/100ml	Absència
Bacteris aerobis a 22 °C	1	ufc/ ml	100
Coliformes totals	Absència	ufc/100ml	Absència
Streptococs fecals (Enterococs)	Absència	ufc/100ml	Absència
Microcistina	<0,2	ug/l	0,50
Clostridium perfringens	0	ufc/100ml	Absència
Suma de Trihalometans	58	ug/l	150
Trihalometans			
Bromodiclorometà	12,0	ug/l	
Bromoform	16,0	ug/l	
Cloroform	7,9	ug/l	
Dibromoclorometà	22,0	ug/l	
Tricloroetè + Tetracloroetè	<10,0	ug/l	10
Hidrocarburs Aromàtics Policíclics (PAH)			
Benzo (b) fluorantè	<0,002	ug/l	
Benzo (ghi) pirè	<0,002	ug/l	
Benzo (k) fluorantè	<0,002	ug/l	
Indè (1.2.3-cd) pirè	<0,002	ug/l	
Plaguicides individuals organoclorats			



J. Arselm Clavé, 23 - 43201 REUS
Tel.: 977 127 219
FAX: 977 342 937
administrado@gaiasa.es

INFORME DE RESULTATS ANALÍTICS

DETERMINACIÓ	RESULTATS	UNITATS	ESPECIFICACIÓ
Aldrin	<0,01	ug/l	0,03
Alfa-HCH	<0,01	ug/l	0,10
Beta-HCH	<0,01	ug/l	0,10
Delta-HCH	<0,01	ug/l	0,10
Gamma-HCH (Lindane)	<0,01	ug/l	0,10
Dieldrin	<0,01	ug/l	0,03
Endrin	<0,01	ug/l	0,10
Ciordano (cis+trans)	<0,01	ug/l	0,10
pp'DDE	<0,01	ug/l	0,10
pp'DDT	<0,01	ug/l	0,10
p,p'-DDD (TDE)	<0,01	ug/l	0,10
Endosulfan I	<0,01	ug/l	0,10
Endosulfan II	<0,01	ug/l	0,10
Endosulfan sulfate	<0,01	ug/l	0,10
Endrin Aldehyde	<0,01	ug/l	0,10
Heptaclor	<0,01	ug/l	0,03
Heptaclor epoxide	<0,01	ug/l	0,03
Hexaclorbenzè (HCB)	<0,01	ug/l	0,10
Metoxidor	<0,01	ug/l	0,10
Oxiciordano	<0,01	ug/l	0,10
Plaguicides individuals organofosforats			
Azinphos-Methyl	<0,05	ug/l	0,10
Coumaphos	<0,05	ug/l	0,10
Demeton	<0,05	ug/l	0,10
Diazinon	<0,05	ug/l	0,10
Dichlorvos	<0,05	ug/l	0,10
Disulfoton	<0,05	ug/l	0,10
Ethoprop	<0,05	ug/l	0,10
Fenitrothion	<0,05	ug/l	0,10
Fensulfothion	<0,05	ug/l	0,10
Fenthion	<0,05	ug/l	0,10
Phorate	<0,05	ug/l	0,10
Malathion	<0,05	ug/l	0,10
Merphos	<0,05	ug/l	0,10
Mevinphos	<0,05	ug/l	0,10
Methyl Parathion	<0,05	ug/l	0,10
Naled	<0,05	ug/l	0,10
Trichloronate	<0,05	ug/l	0,10
Stirophos	<0,05	ug/l	0,10
Plaguicides totals	<0,50	ug/l	0,50