Resum

Aquest Projecte té com a finalitat estudiar noves tècniques alternatives per a l'obtenció d'aigua potable i aigua per a ús agrícola.

Després de realitzar una revisió sobre l'estat de l'art de la dessalació i la seva història, s'aborda la composició i la qualitat requerida per l'aigua segons els diferents usos als quals va destinada, es compara la dessalació amb altres alternatives d'augment d'oferta hídrica i se n'avaluen les diferències.

A continuació, hi ha una revisió sobre les necessitats actuals de recursos hídrics, tant a nivell mundial i europeu, com estatal i català. Tot seguit, s'analitza el procés del canvi climàtic, especialment des del punt de vista de la seva incidència a l'àrea Mediterrània: les seves causes, els seus efectes, les respostes que s'hi estan donant i les que es podrien proposar.

S'estudien les diferents tècniques i processos de dessalació, dividits segons el seu fonament científic, amb especial atenció a l'osmosi inversa, el mètode dessalador hegemònic als països occidentals.

S'analitza l'impacte que té envers el medi ambient el conjunt de tècniques de dessalació, s'identifiquen els principals problemes i es proposen mesures correctores.

A partir de l'estudi de la bibliografia, es proposen nous mètodes de dessalació, i es plantegen dos nous dissenys de plantes dessaladores per obtenir aigua potable i també aigua per a l'aprofitament agrícola.

Tot seguit, s'analitzen tècnicament les plantes dessaladores proposades per al seu estudi. Es dissenyen i es descriuen dos processos, segons es faci servir aigua del mar o salobrosa com a font d'alimentació.

Després, s'estudien els costos econòmics de la dessalació, en termes generals, i de cadascun dels elements que participen en aquesta inversió.

Es conclou amb el pressupost de les dues plantes de dessalació proposades, partint de l'anàlisi dels costos general realitzat, i es comparen les diferències econòmiques entre els dos processos.

Sumari

RESUM 1

SUMARI 3

1. GLOSSARI 7

2. PREFACI 9

2.1. Origen del projecte 9

2.2. Motivació 9

3. INTRODUCCIÓ 11

3.1. Objectius del projecte 11

3.2. Abast del projecte 11

4. REVISIÓ SOBRE L'ESTAT DE L'ART DE LA DESSALACIÓ 13

4.1. Breu referència històrica 13

4.2. Composició i qualitat de l'aigua 15

4.2.1. Qualitat de l'aigua dessalada 17

4.3. La dessalació com alternativa als transvasaments 18

5. REVISIÓ I ANÀLISI DE LES PECULIARITATS DEL CLIMA MEDITERRANI DAVANT EL CANVI CLIMÀTIC 22

5.1. Necessitats d'aigua al món 22

5.1.1. Consum d'aigua al món 26

5.1.2. Consum d'aigua a l'Estat espanyol 28

5.2. Canvi climàtic a la Mediterrània 29

5.2.1. Riscos del canvi climàtic a la Mediterrània 30

5.2.2. Mesures per pal·liar els efectes del canvi climàtic a la Mediterrània 32

6. ANÀLISI DE TÈCNIQUES DE DESSALACIÓ MITJANÇANT PROCESSOS DE MEMBRANES I INTEGRACIÓ DE TECNOLOGIES 34

6.1. Introducció 34

6.2. Estudi de l'osmosi inversa 38

6.2.1. Conceptes bàsics 38

6.3. Criteris per a la selecció de tecnologies 41

6.3.1. Capacitat de producció de la planta 41

6.3.2. Aigua d'alimentació 41

6.3.3. Aplicacions de l'aigua de producte 42

6.3.4. Energia 43
6.4. Impacte ambiental 43
6.4.1. Abocaments de salmorra 44
6.4.2. Altres impactes ambientals 45

7. DISSENY DE PLANTES DE DESSALACIÓ ____ 46

7.1. Cas 1: Integració de la cristal·lització a l'osmosi inversa amb aigua marina 46
7.1.1. Presentació del problema 46
7.1.2. Decisió entre alternatives 46
7.1.3. Proposta de solució 49
7.1.4. Matriu de components associada 51
7.1.5. Principals càlculs realitzats 55
7.2. Cas 2: Optimització del pre-tractament de l'osmosi inversa amb aigües salobroses 58
7.2.1. Presentació del problema 58
7.2.2. Decisió entre alternatives 59
7.2.3. Proposta de solució 60
7.2.4. Matriu de components associada 63
7.2.5. Principals càlculs realitzats 66

8. AVALUACIÓ ECONÒMICA DELS COSTOS DE L'AIGUA PER DESSALAR PER A ÚS DOMÈSTIC I ÚS EN L'AGRICULTURA ____ 68

8.1. Costos d'inversió 69
8.1.1. Components dels costos d'inversió 69
8.1.2. Cost i amortització de cada element d'inversió 70
8.1.3. Cost de la inversió segons els processos de dessalació 71
8.1.4. Cost total d'inversió dels principals processos dessaladors 73
8.2. Costos d'explotació 73
8.2.1. Cost de l'energia 73
8.2.2. Cost de productes i reparacions 75
8.2.3. Altres costos 77
8.2.4. Cost total d'explotació dels principals processos de dessalació 77
8.3. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada 80
8.3.1. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada per a l'agricultura 81
8.3.2. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada potable 82

9. PRESSUPOST DEL PROJECTE ____ 85

9.1. Pressupost associat al cas 1 85
9.1.1. Cost de la inversió 85
9.1.2. Cost d'explotació 89

9.1.3. Avaluació econòmica 93
9.2. Pressupost associat al cas 2 95
9.2.1. Cost de la inversió 95
9.2.2. Cost d'explotació 100
9.2.3. Avaluació econòmica 104

CONCLUSIONS 107

AGRAÏMENTS 109

BIBLIOGRAFIA 111

Referències bibliogràfiques 111
Bibliografia complementària 112

1. Glossari

AGUA	Actuacions per a la gestió i utilització de l'aigua
$CaCO_3$	Carbonat de calci
CV	Compressió de vapor
DMA	Directiva Marc d'Aigües
ED	Electrodiàlisi
EDR	Electrodiàlisi reversible
EEA	Agència europea del medi ambient
IPCC	Panell intergovernamental sobre el canvi climàtic
ME	Evaporació multiefecte
MF	Microfiltració
$MgSO_4$	Sulfat de magnesi
MSF	Evaporació multietapa
NaCl	Clorur de sodi
NF	Nanofiltració
OI	Osmosi inversa
OMS	Organització mundial de la salut
PAC	Política agrària comuna
PHN	Pla Hidrològic Nacional
SDI	Silt density index (Índex d'embrutament de membranes)
TVC	Termocompressió de vapor
UF	Ultrafiltració

2. Prefaci

L'aigua és un recurs imprescindible per a la vida. Constitueix més del 80% del cos de la majoria dels organismes **[51]**, i intervé en la majoria de processos metabòlics que es realitzen en els éssers vius. A més a més, els seus usos en els camps de l'agricultura, la indústria i en moltes accions quotidianes donen una especial rellevància al fet de poder accedir a les quantitats d'aigua necessàries per al correcte desenvolupament de les societats i els ecosistemes.

La disponibilitat d'aigua suficient per assegurar el desenvolupament de les societats i els ecosistemes del planeta constitueix un dels reptes més importants que té per davant la Humanitat al llarg de les properes dècades.

2.1. Origen del projecte

L'aigua cobreix el 71% de la superfície de la Terra. D'aquesta quantitat, el 97% és aigua salada, bàsicament corresponent als mars i oceans, i només el 3% és aigua dolça, l'apta per al consum humà.**[13]**

La població de la Terra està creixent de forma notable, i amb ella, també les necessitats d'aigua estan augmentant substancialment. Conseqüentment, les actuals fonts d'aigua dolça no seran suficients per satisfer la demanda cada cop més gran.

2.2. Motivació

Saber aprofitar el potencial d'aigua que té la Terra per poder respondre a les necessitats hídriques és un repte important del segle XXI. Una de les solucions per treure rendiment de l'aigua que cobreix la superfície del planeta en benefici d'obtenir aigua aprofitable per al consum humà i per les activitats industrials, agrícoles i de serveis és la dessalació.

Aprofundir en l'anàlisi de la dessalació i en l'estudi de les seves noves tècniques alternatives per a l'aigua potable i per a l'agricultura és una via per cercar solucions a aquest gran problema que té plantejat el món actualment, en ple procés del canvi climàtic.

3. Introducció

Degut a la creixent manca d'aigua que s'està produint al planeta, i les previsions d'intensificació d'aquesta escassetat de recursos hídrics al món, degut al fenomen del canvi climàtic, es pretén abordar aquesta problemàtica a partir de l'estudi de l'estat actual de les reserves d'aigua al planeta i la seva possible evolució. Tot seguit, té lloc l'estudi de tècniques alternatives de dessalació per a obtenir aigua potable i també aigua per a poder ser utilitzada en el camp de l'agricultura, dues necessitats bàsiques dels éssers humans.

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és la incorporació de nous elements per millorar les tècniques de dessalació existents, partint de l'estudi d'aquestes, i millorar-ne el rendiment i la viabilitat econòmica, amb l'objectiu de l'obtenció d'aigua potable i aigua per a l'agricultura.

Per fer-ho, es parteix de l'estudi de la situació actual dels recursos hídrics i de seva possible evolució amb els efectes que s'esdevinguin del canvi climàtic.

3.2. Abast del projecte

El projecte s'ocupa, en primer lloc, de les necessitats d'aigua, a nivell mundial, europeu, estatal i català. Tot seguit, es fa una revisió del procés del canvi climàtic, amb especial atenció a les conseqüències a la Mediterrània.

En segon lloc, s'estudien les tecnologies de dessalació més habituals, que es divideixen segons si impliquen un canvi de fase (evaporació) o no (membranes), amb especial atenció a l'osmosi inversa. Es donen uns criteris generals per a la selecció de les diferents tecnologies dessaladores, i s'analitza l'impacte ambiental que poden produir.

Finalment, en tercer lloc, partint de l'estudi dels mètodes dessaladors realitzats, es proposen innovacions per millorar l'eficiència i la qualitat dels mateixos. Per dur-ho a terme, es comparen dos processos, que són analitzats tant tècnicament com econòmicament.

4. Revisió sobre l'estat de l'art de la dessalació

La necessitat d'aigua potable per a la Humanitat és un fet inqüestionable. Les reserves actuals d'aigua són molt escasses. Per això, des de l'Antiguitat, l'home ha buscat la manera de separar la sal de l'aigua del mar, per d'aquesta manera, aprofitar les immenses reserves d'aigua salada dels mars i oceans del planeta.

4.1. Breu referència històrica

Ja a l'antiga Grècia, el filòsof Artistòtil parlava en els seus escrits de la possibilitat de convertir l'aigua del mar en aigua dolça, arribant fins i tot a descriure dispositius per a destil·lar aigua, però només des d'un punt de vista teòric.

Els estudis en els quals es fa referència, des d'un caire pràctic, a la possibilitat plantejada per Aristòtil són una mica posteriors. Concretament, cap al segle III després de Crist, hi ha escrits on apareixen descripcions d'aparells per a dessalar aigua mitjançant la condensació de vapor. En aquest context, a l'antiga Grècia ja es va fer servir un prototipus de dessalació tèrmica per evaporació en els vaixells que navegaven per la Mediterrània. Més tard, cap a l'Edat Mitjana, molts alquimistes àrabs i perses practicaven la dessalació de l'aigua del mar. **[40]**

Als inicis del Renaixement, alguns alquimistes àrabs dessalaven l'aigua del mar fent ús de l'energia solar. Per fer-ho, necessitaven atuells de vidre, dins dels quals hi dipositaven l'aigua del mar. Seguidament, escalfaven l'aigua gràcies a uns miralls que reflectien la radiació solar sobre els atuells, aportant d'aquesta manera la calor necessària per a l'evaporació de l'aigua. Però va ser l'any 1675 quan es va enregistrar la primera patent sobre dessalació.

Als inicis del segle XIX, es torna a fer servir el mètode de dessalació ja emprat a l'Antiguitat pels vaixells grecs, amb l'aparició de la navegació a vapor dels vaixells transoceànics aprofitant la calor residual de les calderes, evitant així la necessitat de proveïment de l'aigua dolça, **[8]** pràctica que més endavant es va deixar d'utilitzar a causa dels costos desproporcionats requerits per a la seguretat del seu correcte funcionament. L'any 1872, l'enginyer suec Carles Wilson va construir la primera planta dessaladora de grandària industrial. Es tractava d'un "Solar Still" de 4757 m^2, amb una producció diària de 22,5 $m^{3/}$dia. Aquesta planta fou construïda a les zones salines de Xile. El seu rendiment, com es pot comprovar, era molt baix, però era la primera forma d'obtenció d'aigua dolça per a l'abastiment de la població dedicada al sector de la mineria en un indret de naturalesa àrida, i geogràficament remot.

Posteriorment, l'any 1884 es fabrica per primera vegada un evaporador per a un vaixell aprofitant l'energia residual del vapor de sortida de la seva caldera. Tota la primera tecnologia anava encaminada a l'efecte negatiu que té l'aigua salada als tubs dels intercanviadors: incrustacions, corrosió, etc.

En els inicis del segle XX es van construir algunes petites plantes dessaladores portàtils, especialment dissenyades per a ser utilitzades durant confrontacions bèl·liques. La primera meitat del segle XX va ser totalment dominada per les tecnologies d'evaporació, i es va incidir especialment en el disseny de nous tipus d'intercanviadors més eficients i compactes que produïen cada vegada més aigua dolça amb menys consum. La facilitat de combinació amb instal·lacions productores d'energia i la seva robustesa i capacitat ha contribuït a la seva manutenció en el panorama mundial.

A la Segona Guerra Mundial, es va donar un pas important, motivat per l'establiment militar en zones desèrtiques que demanaven aigua potable per als seus soldats. La dessalació va oferir solucions al problema, i per aquesta raó, es va continuar utilitzant després de la guerra a diferents països. El govern dels Estats Units va considerar el tema d'una importància estratègica militar, i es va gastar més de 300 milions de dòlars en recerca. Aquesta investigació es va convertir en la base del coneixement actual sobre la dessalació d'aigua.

No obstant, la dependència energètica d'aquest tipus de planta i el seu elevat consum va motivar la recerca d'altres alternatives en el món de la dessalació, com ara les membranes. Les primeres investigacions per a dessalació tenen el seu origen a la dècada dels anys 30, quan Ferry les recopila l'any 1936 i les classifica segons els seus materials emprats (naturals, de malla porosa, coure...). Però les primeres experiències de membranes amb rebuig de sals acceptable per a la dessalació són de Reid i Breton a la Universitat nord-americana de Florida l'any 1953, que van obtenir un rebuig del 98% fent servir membranes planes d'acetat de cel·lulosa. **[10]**

Posteriorment, Loeb i Sourirajan el 1960 van millorar el flux d'aquest tipus de membranes. En els anys 70, el material de les membranes se substitueix per poliamida aromàtica, que augmentaven el rebuig a les sals fins a un 99%. La primera membrana d'aquest tipus per a aigua de mar és del 1972, només dos anys després de l'aparició de les primeres membranes per a aigües salades. A partir d'aquesta data, la recerca de nous materials (la majoria d'ells de naturalesa orgànica, com la pròpia poliamida aromàtica) ha contribuït a evitar, de forma considerable, els problemes derivats de l'operació de les mateixes (no tolerància a certs components) així com a disminuir la pressió mínima necessària per a l'obtenció del filtrat. **[14]**

En el propi cicle hidrològic de l'aigua existeix el fenomen de la dessalació en el procés d'evaporació d'aigües marines. De fet, anualment s'evaporen dels oceans 502800 km^3

d'aigua i 65200 km^3 dels continents. Generalment, tots els processos de dessalació més antics estaven relacionats amb el fenomen de l'evaporació d'aigües amb contingut de sal, amb l'ús de vapor de procés o energia solar, fins a l'aparició de les membranes amb qualitat suficient per filtrar les concentracions d'aigua del mar. A partir de llavors, aquest tipus de tecnologia ha estat més desenvolupat que d'altres tipus de processos, especialment a l'Estat espanyol, degut a les qualitats de l'aigua introduïdes als seus mòduls. Al capítol B de l'Annex hi ha informació sobre la capacitat de dessalació al món, on Espanya ocupa el cinquè lloc dels països productors d'aigua dessalada, amb 1,8 hm^3/dia de producció. L'Aràbia Saudita encapçala aquesta llista, amb 6,5 hm^3/dia.

L'origen i l'estat actual de les diferents tècniques de dessalació són explicades al capítol 6, i al capítol E de l'Annex, on té lloc la descripció detallada de cada mètode.

4.2. Composició i qualitat de l'aigua

L'aigua del mar, la que es farà servir en la dessalació, no és pura, sinó que conté altres substàncies, ja estiguin en suspensió o dissoltes. La salinitat és el paràmetre que mesura la concentració de sal comuna (NaCl) sobre el volum d'aigua total. **[2]** La unitat usual de mesura de la salinitat és el ppm (o parts per milió), que indiquen els grams que hi ha de sal en un litre d'aigua, que varia segons els mars i oceans, tal i com es pot veure a la figura 4.1.:

Mar o oceà	*Salinitat aproximada (ppm)*
Mar Bàltica	7000
Mar Negra	13000
Mar Adriàtica	25000
Oceà Pacífic	33600
Oceà Índic	33800
Mar Carib	38600
Mar Mediterrània	31500
Oceà Atlàntic	39400
Golf d'Aràbia	43000

Mar Roja	43000

Fig. 4.1. Variació de la salinitat al món **[9]**

La composició química de l'aigua marina canvia en funció de la densitat de l'aigua, així com altres paràmetres físics i químics. De tota manera, a la figura 4.2. hi ha la composició química mitjana d'un litre d'aigua del mar:

Component	*Quantitat (en grams per litre d'aigua marina)*
Clorur de sodi (NaCl)	24,0
Clorur de magnesi ($MgCl_2$)	5,0
Sulfat neutre de sodi (Na_2SO_4)	4,0
Clorur de calci ($CaCl_2$)	1,1
Clorur de potassi (KCl)	0,7
Bicarbonat de sodi ($NaHCO_3$)	0,2
Bromur de sodi (NaBr)	0,096
Àcid bòric (H_3BO_3)	0,026
Clorur d'estronci ($SrCl_2$)	0,024
Fluorur de sodi (NaF)	0,003

Fig. 4.2. Composició química mitjana aproximada d'un litre d'aigua del mar amb una salinitat aproximada del 34,5% i un pH entre 7,9-8,3 **[60]**

L'aigua, segons la seva concentració en sal, pot ser dolça, marina o salmorra. De fet, la diferència entre les tres és únicament la seva salinitat. Així, l'aigua del mar té de mitjana uns 35 grams de sal per litre. L'aigua dolça té uns 0,5 grams per litre, i la salmorra, uns 69 grams per litre. **[10]**

Tipus d'aigua	*Salinitat (ppm de TDS)*
Ultrapura	0,03
Pura	0,3
Desionitzada	3
Dolça (Potable)	< 1000
Salobrosa	1000-10000
Salina	10000-30000
Marina	30000-50000
Salmorra	> 50000

Fig. 4.3. Tipus d'aigua en funció de la seva salinitat, en TDS (Total de Sòlids Dissolts) **[10]**

A la figura 4.3., es fa referència als diferents tipus d'aigua que hi ha en funció de la seva salinitat, en aquest cas mesurada en funció del total de sòlids dissolts (TDS). És important conèixer la salinitat de l'aigua que s'està tractant, ja que serà un dels factors per a la selecció de la tècnica de dessalació adequada.

A l'apartat A.1. de l'Annex hi ha un quadre amb la composició química de l'aigua del mar detallada per a cada component i l'explicació del paràmetre SDI (índex d'embrutament de membranes). De la mateixa manera, a l'apartat A.4. de l'Annex hi ha informació sobre la qualitat de l'aigua segons si el seu ús serà domèstic, industrial o bé agrícola.

4.2.1. Qualitat de l'aigua dessalada

La qualitat de l'aigua obtinguda durant el procés dessalador fa referència al grau de reducció de la seva presència d'ions després de l'aplicació del mètode. A la figura 4.4. es pot veure la qualitat de l'aigua resultant de diferents processos:

	Osmosi inversa (1 pas)	*Osmosi inversa (2 passos)*	*Evaporació*
Ca^{2+} (mg/L)	2	0,1	0,5
Mg^{2+} (mg/L)	6	0,3	1,5
Na^{+} (mg/L)	128	15	12
K^{+} (mg/L)	4	0,8	0,5
HCO_3^{-} (mg/L)	8	0,4	0,1
SO_4^{2-} (mg/L)	11	0,6	3,0
Cl^{-} (mg/L)	208	23	22
TDS (mg/L)	367	40	40
SiO_2 (mg/L)	0,1	0,0	0,0
CO_2 (mg/L)	23	12	
pH	5,8	5,2	7,2

Fig. 4.4. Qualitat mitjana de l'aigua obtinguda per diferents processos de dessalació **[14]**

El procés de dessalació pel qual s'obté una millor qualitat de l'aigua és el conjunt de mètodes d'evaporació, que són detallats a l'apartat E.1. de l'Annex. Malgrat això, l'osmosi inversa també deixa uns bons paràmetres de qualitat, sobre tot si es fan servir 2 passos, és a dir, que l'aigua producte que surt del mòdul d'osmosi inversa sigui l'aigua d'alimentació per a un segon mòdul d'osmosi inversa (veure apartat E.2.2. de l'Annex). La selecció del mètode dependrà de l'ús que se li doni a l'aigua producte i dels requeriments de qualitat d'aigua de la finalitat concreta a què vagi destinada.

4.3. La dessalació com alternativa als transvasaments

Per mirar de pal·liar la manca d'aigua a l'Estat espanyol, han estat moltes les solucions proposades des de les instàncies governamentals. Partint del desequilibri d'aigua existent a

les diferents conques hidrogràfiques peninsulars (veure apartat A.3. de l'Annex), el govern central, ocupat pel Partit Popular (PP) amb majoria absoluta (anys 2000-2004) va proposar l'anomenat Pla Hidrològic Nacional (PHN), la mesura estrella del qual era el transvasament d'aigua del riu Ebre a l'alçada del seu curs baix, a Catalunya, fins a les conques del País Valencià, Múrcia, la conca mediterrània andalusa i les conques internes catalanes. Aquest projecte va originar molta polèmica a Catalunya, i també a l'Aragó, i va ser motiu de controvèrsia política.

Altres col·lectius polítics i econòmics van proposar el transvasament d'aigua procedent del riu Roine, a França, una opció que finalment no va reeixir entre les classes dirigents espanyoles del moment.

L'any 2004, amb el tomb polític a l'Estat, el nou govern espanyol va decidir derogar el projecte de transvasament de l'Ebre, tot substituint-lo pel programa AGUA, que comporta una sèrie de mesures alternatives, entre les quals hi té un pes específic molt important la dessalació. A l'Annex D es poden veure aquestes mesures previstes al programa AGUA.

El debat suscitat entorn a la conveniència d'una o altra solució té un rerafons d'interessos polítics, econòmics i socials. Ambdues propostes tenen en comú que parteixen de la base d'augmentar l'oferta hídrica espanyola. Per tant, qualsevol d'aquestes propostes, per si mateixa, deixa de banda l'estalvi d'aigua que es podria produir per una millor gestió:

- De la demanda agrícola, amb programes massius de modernització de conduccions i dels sistemes de rec en els conreus de regadiu.

- De la demanda urbana, amb la minimització de pèrdues de les xarxes i programes de sensibilització de la població que incloguin dispositius d'estalvi, i també amb la reutilització al màxim dels efluents secundaris de les depuradores per usos de menor qualitat a la pròpia ciutat.

- De les aigües subterrànies, amb utilització real dels mercats d'aigües.

Per tant, l'alternativa de la dessalació és aconsellable com a solució concreta i d'abast local, un cop examinades totes les possibilitats de millor gestió dels recursos hídrics ja existents.

Comparant la dessalació amb la política de transvasaments, des d'un punt de vista científic es pot arribar a concloure que la primera d'aquestes dues alternatives és la més fiable, ja que no depèn de les incerteses climàtiques que porta associat un projecte de transvasament en àrees on les precipitacions són molt irregulars, com és el cas de la conca mediterrània. En concret, el PHN contemplava el transvasament de 1050 hm^3 del riu Ebre a les conques deficitàries de la Mediterrània. A la figura 4.17. es pot comprovar la irregularitat del cabal del riu objecte del transvasament: l'Ebre, en el seu curs baix.

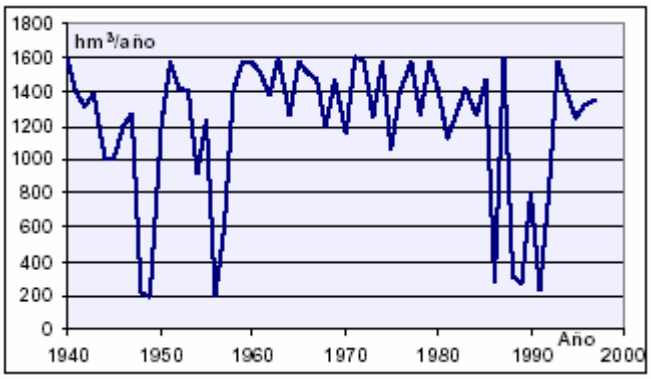


Fig. 4.4. Sèrie històrica de cabals derivables del Baix Ebre, en hm^3/any **[11]**

Un segon argument a favor de la dessalació en comptes del transvasament de l'Ebre és que resulta una opció molt més econòmica. Cal tenir en compte que les tècniques de dessalació són encara molt recents (l'osmosi inversa té uns 30 anys de vida a Espanya) i per tant, és una tecnologia els costos de les quals han disminuït des del seu naixement, com es pot veure a la figura 4.5., al contrari de les obres hidràuliques, molt més madures i de costos fàcilment desviables.

Fent una anàlisi de costos entre les dues alternatives, es troba que el límit inferior de la rendibilitat del transvasament enfront de la dessalació es trobaria a la Regió de Múrcia, allà on precisament la rendibilitat agrícola és menor i no podria suportar els costos associats al transvasament.

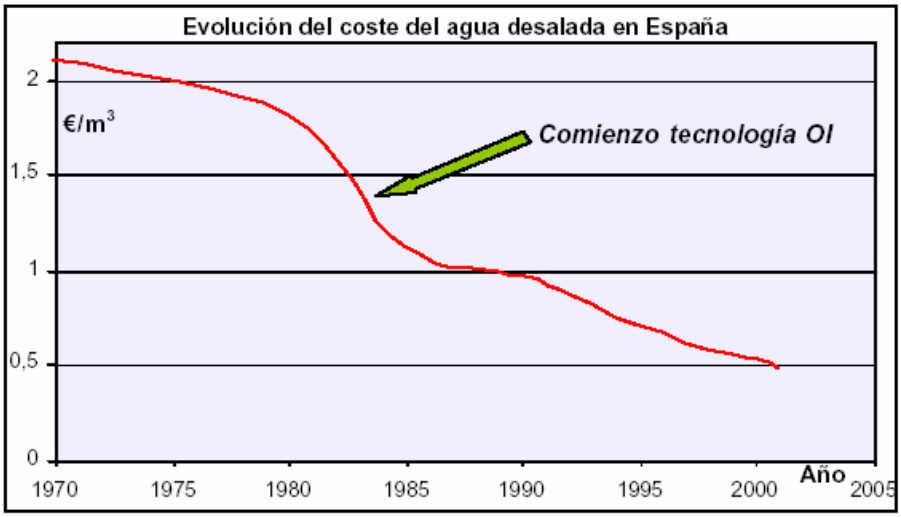


Fig. 4.5. Evolució dels costos de l'aigua dessalada a Espanya **[11]**

Finalment, un altre clar avantatge de la dessalació és la seva millor adaptabilitat a les necessitats locals, es pot modular millor i la seva rapidesa d'instal·lació és molt superior, enfront de la rigidesa de l'opció del transvasament, que és homogènia en la seva concepció, ja que no permet abordar més solucions que la pròpiament derivada del transvasament.

En ser una opció igual i única per a tots els territoris afectats pel projecte, crea una dependència dels territoris receptors d'una solució única, de les circumstàncies climàtiques de la conca que cedeix l'aigua (en aquest cas, la conca de l'Ebre), del règim de precipitacions anuals a la conca de l'Ebre i també de l'acceptació social, fet que pot provocar, com ha sigut el cas del projecte impulsat per l'anterior govern espanyol, molta polèmica, controvèrsia política i tensions socials i territorials entre diferents Comunitats Autònomes. **[5]**

5. Revisió i anàlisi de les peculiaritats del clima mediterrani davant el canvi climàtic

L'ONU defineix el canvi climàtic com el canvi de clima, atribuït directament o indirecta a l'activitat humana que altera la composició de l'atmosfera mundial i que se suma a la variabilitat natural del clima observada durant períodes de temps comparables. **[56]** En aquest espai es revisen les necessitats de l'aigua que hi ha actualment, i els riscos que aquest canvi climàtic pot ocasionar a l'àrea de la Mediterrània, així com les mesures que es poden prendre per mirar de pal·liar els seus efectes.

Al capítol C de l'Annex hi ha més informació sobre el canvi climàtic a nivell global, les causes i les conseqüències que pot dur, i les respostes que s'hi estan donant per part de les autoritats. D'altra banda, s'hi analitzen també els efectes que aquest pot tenir en els recursos hídrics del món, en l'agricultura, la salut humana, el nivell de mars, oceans i zones costaneres, i en la diversitat ecològica i els ecosistemes.

5.1. Necessitats d'aigua al món

La necessitat de la dessalació ve marcada per la creixent escassetat dels recursos hídrics al món, fet que és especialment greu a l'Estat espanyol.

Paradoxalment, les reserves d'aigua del planeta són enormes. La hidrosfera cobreix un 71% de la Terra, que són exactament 1,386 milions de km^3. Tot i això, la quantitat corresponent a mars i oceans és el 97,5% del total de reserves d'aigua del planeta.

El 2,5% que resta, corresponent a les reserves d'aigua dolça del planeta, és a dir, la que és apta per al consum humà, es distribueix de la següent manera: un 68,9% és en forma de glaceres i neus permanents, un 29,9% és aigua dolça subterrània, un 0,9% està en forma d'humitat al sòl, i només un 0,3% és aigua dolça aprofitable per a l'ésser humà, i és en forma de llacs i rius. **[13]**

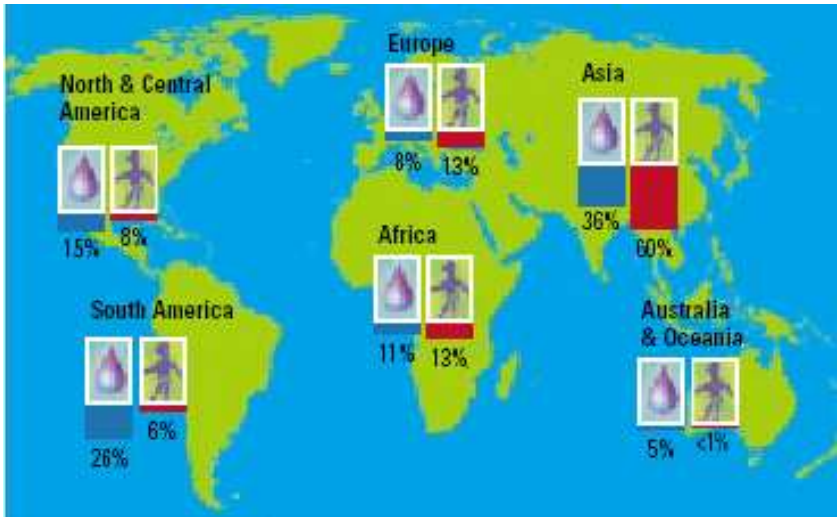


Fig. 5.1. Comparativa de disponibilitat d'aigua versus població **[13]**

Aquesta desigual distribució de l'aigua al món, amb unes reserves d'aigua dolça aprofitable tan escasses en proporció al total d'aigua existent no és l'únic desequilibri pel que fa a la distribució d'aigua al món. A la figura 5.1. es pot apreciar, per a cada continent, el percentatge d'aigua disponible en comparació al percentatge de població que hi ha en aquella zona.

Com es pot observar, els desequilibris són evidents. Així, mentre a Oceania i Amèrica, amb menys percentatge de població mundial, disposen de més reserves d'aigua, a Europa, Àfrica i sobre tot Àsia, hi ha molta més població que aigua disponible.

Els recursos hídrics que hi ha al planeta poden anar variant, en funció del cicle hidrològic de l'aigua, que és el moviment que realitza aquest líquid des que s'evapora, fins que precipita i s'escola al sòl. **[63]**

A la figura 5.2., es poden apreciar els diferents recursos hídrics disponibles en els següents països i els seus respectius continents:

País o continent	*Recursos hídrics anuals (km^3)*	*Recursos hídrics (m^3/habitant)*
Alemanya	96	1165
Espanya	**110,3**	**2775**
França	180	3065

Irlanda	47	13187
Noruega	384	87691
Regne Unit	71	1219
Rússia	4312,7	29115
Suïssa	42,5	5802
EUROPA	6142,9	
Canadà	3287	120000
Estats Units	2930	11500
AMÈRICA DEL NORD	6217	
Argentina	270	17000
Brasil	6220	45200
Colòmbia	1200	35000
Cuba	34,7	3110
Mèxic	345	3670
Perú	1100	50300
Veneçuela	856	36830
AMÈRICA DEL SUD	10683	
Algèria	13,87	460
Angola	184	15376
Camerun	268	18711
Egipte	2,8	43
Guinea	226	29454

Líbia	0,6	100
Sierra Leone	160	34957
Sud-àfrica	44,8	1011
ÀFRICA	3988,1	
Aràbia Saudita	2,4	119
Xina	2800	2231
Emirats Àrabs	0,15	64
Índia	1850	1896
Indonèsia	2530	12251
Japó	547	4344
Kuwait	0,02	11
Malàisia	456	21259
Turquia	196	3074
ÀSIA	12686,5	
Austràlia	343	18596
Nova Zelanda	313	89400
OCEANIA	1539,3	

Fig. 5.2. Taula de recursos hídrics anuals i per habitant de diferents països i continents **[14]**

Tal i com es pot observar a la figura 5.2., els recursos hídrics es troben distribuïts al món de forma molt desigual. Així, només sis països (Brasil, Canadà, Rússia, Estats Units, Xina i Índia) acumulen gairebé la meitat de la totalitat de recursos existents al planeta.

D'altra banda, es considera que un país pateix escassetat d'aigua per sota del llindar de 1000 m^3/habitant i any. D'aquesta manera, tots els països de l'Orient Mitjà i del Magrib es troben en aquesta situació, que porta com a conseqüència la sobreexplotació d'aqüífers i una amenaça per al desenvolupament de les seves societats.

Els països amb menys recursos d'aigua dolça són Egipte i Emirats Àrabs. Per contra, els que tenen més recursos hídrics són Islàndia i Surinam. **[45]** L'Estat espanyol, amb 2775 m^3/habitant i any, està per sobre d'aquest límit de 1000 m^3/habitant i any, establert internacionalment.

També cal tenir en compte que no sempre la disponibilitat de recursos hídrics en un determinat país garanteix la seva correcta distribució ni qualitat. Aquest és el cas de molts països africans i asiàtics, on moltes persones poden trigar fins a 3 ó 4 hores diàries a aconseguir aigua. A l'apartat A.2. de l'Annex hi ha més informació sobre els recursos hídrics al món.

5.1.1. Consum d'aigua al món

El correcte aprofitament dels recursos hídrics disponibles al món depèn molt del consum que se'n faci. L'aigua, com ja s'ha dit, és un element imprescindible per a la vida. L'OMS (Organització Mundial de la Salut) calcula en 150 litres per persona i dia la quantitat mínima d'aigua necessària per garantir unes condicions higièniques adequades. **[57]** La figura 5.3. mostra el consum d'aigua dolça a diferents països:

Continent o país	*Consum hídric anual (m^3/ habitant i any)*
Europa	726
Àsia	526
Àfrica	244
Amèrica del Sud	476
Amèrica del Nord i Central	1692
Oceania	907
Rússia	1330
Espanya	**1174**

Total mundial	660

Fig. 5.3. Taula de consums hídrics anuals i per habitant de diferents països i continents **[14]**

Com es pot apreciar a la figura 5.3., el consum hídric a l'Estat espanyol supera amb escreix la mitjana europea, essent la societat nord-americana la que més consumeix.

Cal tenir en compte també quins són els usos a què es destina el consum d'aigua. Majoritàriament, l'agricultura, el consum domèstic i la indústria són els tres grans camps d'utilització del consum hídric.

A la figura 5.4., es pot apreciar la distribució dels usos de l'aigua a diferents països europeus:

País	*Ús domèstic (m^3/p/any)*	*Ús domèstic (%)*	*Ús agrícola (m^3/p/any)*	*Ús agrícola (%)*	*Ús industrial (m^3/p/any)*	*Ús industrial (%)*
Àustria	58	19	24	8	222	73
Bèlgica	97	11	35	4	746	85
Dinamarca	68	30	98	43	61	27
Finlàndia	56	12	14	3	399	85
França	94	16	89	15	407	69
Alemanya	100	14	128	18	484	63
Grècia	45	8	357	63	164	29
Irlanda	54	16	34	10	248	74
Itàlia	138	14	580	59	265	27
Holanda	25	5	167	34	300	61
Noruega	92	20	37	8	332	72

Portugal	112	15	357	48	276	37
Espanya	**97**	**15**	**519**	**80**	**32**	**5**
Suècia	120	36	30	9	183	55
Suïssa	81	23	14	4	256	73
Regne Unit	40	20	6	3	155	77
Rússia	100	19	105	20	327	62

Fig. 5.4. Taula dels usos de l'aigua a diferents països d'Europa, en quantitat de m^3 per persona i any, i en percentatge respecte el total de consum hídric **[15]**

Els països amb un grau més alt de desenvolupament dediquen més recursos hídrics a l'ús industrial en comptes de l'agrícola. D'aquesta manera, els Estats Units dediquen un 49% a l'ús industrial. En canvi, la Xina dedica un 87% a l'ús agrícola. A la figura 5.4., es poden observar els diferents usos d'alguns països europeus. Així, per exemple, els països mediterranis, com Espanya, Portugal, Grècia o Itàlia, dediquen una gran quantitat d'aigua a l'agricultura. En canvi, els països nòrdics destaquen per l'ús industrial dels seus recursos hídrics.

5.1.2. Consum d'aigua a l'Estat espanyol

L'Estat espanyol és el país europeu que més aigua fa servir per a l'agricultura, que s'emporta un 80% dels recursos hídrics disponibles. L'ús industrial es redueix al 5% del total, i l'ús domèstic té el 15% restant.

La desvinculació dels ajuts procedents de la PAC (Política Agrària Comuna) europea està portant a una reorientació productiva en una part important de les zones de rec espanyoles. Això afecta l'ús de l'aigua especialment on el secà és una opció viable. A l'apartat A.3.2. de l'Annex s'aprofundeix en aquesta qüestió.

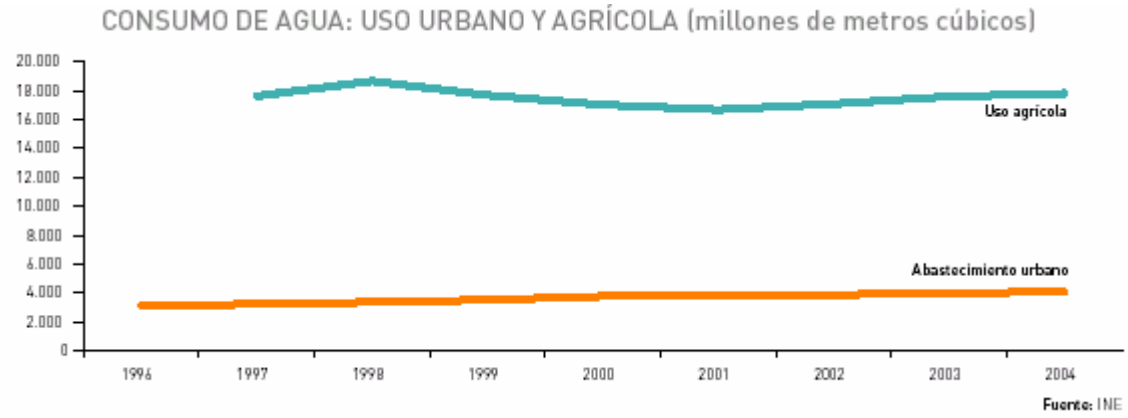


Fig. 5.5. Usos del consum d'aigua a l'Estat espanyol (quantitats en milions de m^3) **[6]**

Els últims deu anys, el consum domèstic i urbà de l'aigua ha crescut prop d'un 30%, mentre que l'ús agrícola s'ha estabilitzat, com es pot comprovar a la figura 5.5., on es veu clarament la predominància de l'ús de l'aigua per a l'agricultura.

Pel que fa als recursos hídrics a Catalunya, les seves conques internes es mantenen al voltant de la meitat de la seva capacitat total. A l'apartat A.3. de l'Annex s'amplia la informació sobre les necessitats d'aigua a l'Estat i a Catalunya.

5.2. Canvi climàtic a la Mediterrània

La regió de la Mediterrània, un mosaic ric i fràgil de paisatges i ecosistemes, és un dels punts de més biodiversitat del món. La disponibilitat dels recursos de l'aigua és un tema controvertit en aquesta àrea perquè els nivells de consum són superiors als recursos disponibles. Aquesta tendència associada al canvi climàtic porta a una inestabilitat dels recursos sensibles de la Mediterrània que agreujaria les diferències entre el nord i el sud de la riba:

- Els països del nord de la Mediterrània, amb més quantitat i regularitat de pluges, pateixen també riscos naturals derivats del clima (com inundacions i escassetat d'aigua en conques susceptibles de períodes de sequeres). Aquests països hauran d'afrontar la degradació de la qualitat de l'aigua, així com les creixents necessitats de protecció ambiental i restauració.

- Al sud i l'est de la Mediterrània, on l'ús d'aigua està arribant als límits hidrològics, juntament als efectes combinats del creixement demogràfic, la continuada activitat econòmica i la millora dels nivells de vida, ha incrementat la competència pels recursos restants. L'aigua ja està sobreexplotada o arribarà a estar-ho, degut principalment al probable creixement demogràfic.

5.2.1. Riscos del canvi climàtic a la Mediterrània

Molts fenòmens associats al canvi climàtic amenacen l'equilibri dels ecosistemes mediterranis. Els impactes projectats suposaran hiverns més humits i estius més secs i calorosos juntament amb onades de calor.

Els canvis a les temperatures i els nivells de precipitació i la distribució afectarà directament la demanda, qualitat i conques. La contaminació s'intensificarà pels abocaments a les conques procedents de zones urbanes. Els rius tindran baixos nivells particularment a l'estiu, tal i com es pot veure a la figura 5.6., i la temperatura del mar, la salinitat i concentració de CO_2, de nitrats i fosfats seran afectats. Els impactes més visibles seran les inundacions, que seran més freqüents i intenses.

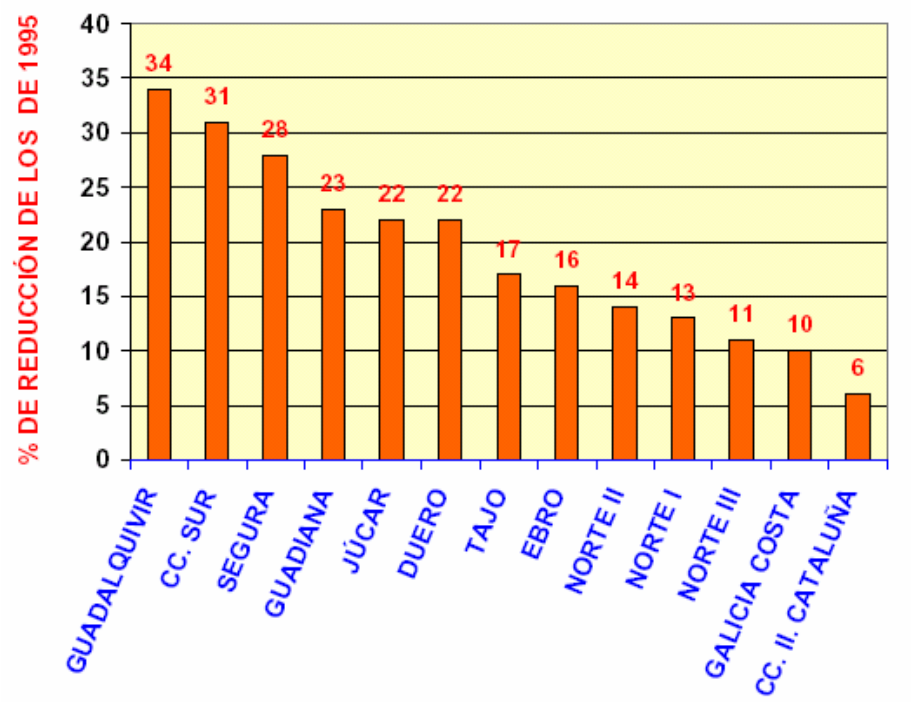


Fig. 5.6. Percentatge de reducció dels recursos hídrics previst per a l'any 2060 a les conques hidrogràfiques de l'Estat espanyol en relació als nivells de l'any 1995 **[21]**

Com es pot veure a la figura 5.6., les conques del sud i de l'est de l'Estat, amb intensitat especial les conques mediterrànies, patiran especialment la manca de recursos d'aigua, segons les previsions realitzades. Les conques internes de Catalunya són les menys perjudicades per aquest descens dels recursos hídrics, segons aquests estudis duts a terme tenint en consideració els paràmetres del canvi climàtic marcats per les organitzacions

internacionals. La mitjana de l'Estat perdrà un 17% dels seus recursos d'aigua degut als efectes del canvi climàtic, el que suposa una quantitat equivalent de 20115 hm^3 d'aigua.

La conca mediterrània, doncs, serà una de les més afectades del planeta, degut a les seves característiques "especials", per la qual cosa patirà abans, i de forma més intensa, les pertorbacions climàtiques derivades de l'escalfament. Aquestes previsions, realitzades per l'expert i Premi Rei Jaume I del Medi Ambient de Protecció Ambiental, José Luis Rubio i el doctor Millán, de la Fundació Centres d'Estudis Ambientals del Mediterrani, **[53]** apunten, a més, a què en un segle es produirà un increment de temperatura entre 1 i 5,5 graus a la zona mediterrània, fet que es traduirà en la reducció de precipitacions i en esdeveniments climàtics extrems, com ara l'anomenada "gota freda", perquè plourà menys, però amb més erosivitat. Totes aquestes previsions marquen una tendència a l'aridificació de la Mediterrània, que tindrà com a conseqüència immediata la reducció de la capacitat biològica del sòl per a proporcionar humitat per les produccions agrícoles.

Els efectes del canvi climàtic es poden percebre ja a la conca mediterrània. S'estan perdent les tempestes d'estiu, i estan augmentant les tempestes torrencials de tardor, un procés climàtic que contribueix a les inundacions del centre d'Europa amb massa d'aire humit que abans precipitava, i ara ho fa en un altre lloc. Això comportarà un augment en la salinitat per l'evaporació a la mar Mediterrània, que pot tenir repercussions molt negatives per a l'agricultura, ja que pot alterar i endarrerir els cicles de floració i fructificació, a més d'un increment de les plagues i la invasió d'espècies exòtiques. Cal tenir en compte que està previst un augment del consum de regadius, tal i com es pot veure a la figura 5.7.:

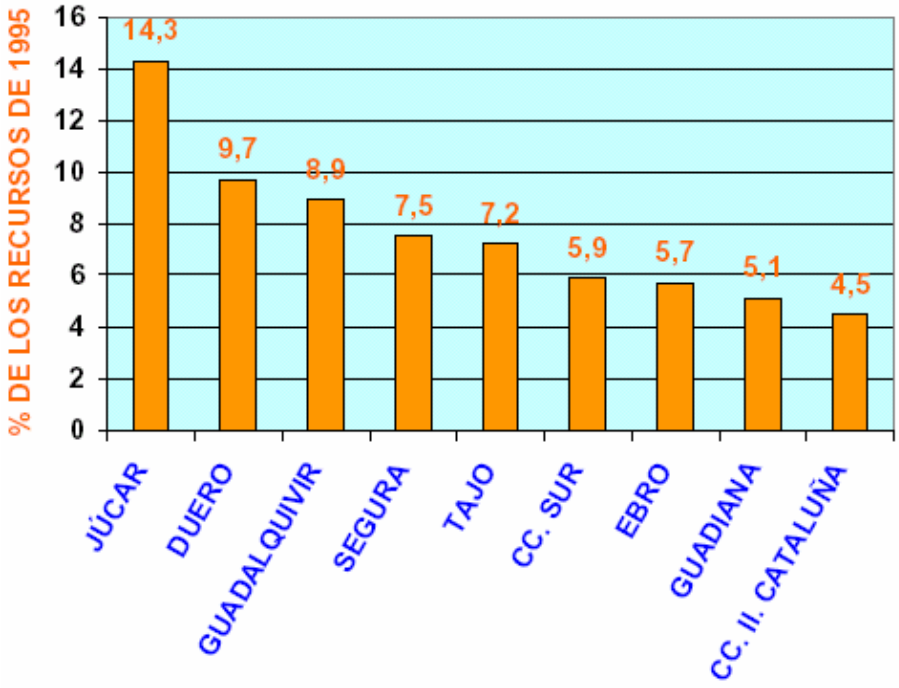


Fig. 5.7. Percentatge d'augment previst per a l'any 2060 del consum en regadius a les conques hidrogràfiques de l'Estat espanyol en relació als nivells de l'any 1995 **[21]**

L'augment del consum perjudicarà notablement les ja prou malmeses reserves d'aigua a les conques hidrogràfiques. Com es pot veure a la figura 5.7., la conca del Xúquer, mediterrània, serà una de les que haurà d'afrontar aquest augment de consum de regadius. Les causes d'aquest augment venen donades per la manca de precipitacions, que combinada amb els augments d'evaporació, de transpiració vegetal i de la biomassa de les plantes en un món afectat pel canvi climàtic i l'efecte hivernacle, provocaran aquesta pujada del consum per hectàrea als regadius actuals.

L'any 2004, l'Agència Europea del Medi Ambient (EEA) va analitzar les conseqüències de l'escalfament global. Entre d'altres, s'apuntava que a la Península Ibèrica tindria lloc un increment mitjà de la temperatura de 4ºC durant el segle XXI. **[35]** Les onades de calor durant l'estiu també són un efecte del canvi climàtic. L'any 2006, segons l'Institut Nacional de Meteorologia espanyol, va ser el més calorós de tota la història, almenys des que hi ha registres, aproximadament fa 150 anys. L'any 2007 ha suposat un fre a aquesta tendència d'augment de les temperatures, fet que indica que el canvi climàtic és un procés a llarg termini, a molts anys vista. Per exemple, segons estudis del Ministeri de Medi Ambient espanyol, d'aquí a 20 anys la temperatura haurà pujat uns 2ºC de mitjana, arribant a pujar-ne 7ºC cap a l'any 2071. Les glaceres alpines, entre 1850 i 1980, ja s'han reduït en un terç i el desgel seguirà augmentant els abocaments fluvials al nord d'Europa i una dessecació dels rius del sud, amb la conca mediterrània espanyola com a gran perjudicada.

5.2.2. Mesures per pal·liar els efectes del canvi climàtic a la Mediterrània

Existeixen tres grans blocs de mesures per afrontar l'escalfament global als països amb clima mediterrani:

- Reduir el risc de variabilitat hidrològica i inundacions: Un increment en la incidència d'inundacions, sequeres i altres fets extrems degut al canvi climàtic és una amenaça considerables per les economies dels diferents països i per un desenvolupament sostenible. Els gestors d'aigua reduiran el risc de variabilitat hidrològica mitjançant el reforçament de programes preparatoris a inundacions i sequeres, la introducció de mesures de gestió per regular els abocaments, l'erosió i els sediments i la modificació de les infraestructures per fer-les més segures a les inundacions. Una altra eina interessant per reduir l'impacte de les inundacions seria l'increment de la filtració i de l'augment de la capacitat dels sistemes d'aigua urbans per tempestes.

- Ajustar la demanda i l'oferta als recursos de l'aigua: La demanda d'aigua a la Mediterrània s'excedeix ara o amenaça amb sobrepassar els nivells sostenibles de l'oferta per superar els nivells renovables dels aqüífers. Algunes respostes possibles a aquest problema poden ser introduir una major flexibilitat per ajustar la quantitat d'aigua amb la seva demanda, optimitzar l'existent regulació d'infraestructures de l'aigua mitjançant usos més eficients i continus canvis en les prioritats de distribució de l'aigua. Un equilibri més gran entre mesures eficaces (reciclatge, conservació) i noves mesures d'oferta (a través de recollida d'aigua i dessalinització) constituirien altres mètodes de reduir la bretxa entre la demanda i oferta dels recursos hídrics.

- Equilibrar les necessitats humanes i de la naturalesa: El deteriorament permanent dels recursos hídrics i de terres amenaça la continuïtat de producció de béns i serveis a partir d'ecosistemes de conques fluvials. Es necessita urgentment la protecció i restauració dels ecosistemes amb l'objectiu de mantenir i restaurar les capacitats naturals que sustenten la protecció de persones i béns davant una variabilitat climàtica més gran. Caldrà introduir mesures que reconeguin les necessitats ambientals en el repartiment d'aigua, reconèixer i mantenir els serveis ecològics dels rius i les zones humides (recarregant els aqüífers i purificant les aigües), i adaptar les mínimes provisions dels cabals ambientals a les estacions i als cicles d'aigua de les zones humides.

6. Anàlisi de tècniques de dessalació mitjançant processos de membranes i integració de tecnologies

6.1. Introducció

La dessalació és el procés de separació de sals d'una dissolució aquosa. Un sistema de dessalació és una operació de separació, en la qual el corrent d'alimentació té una alta concentració de sals, i s'introdueix a la unitat dessaladora, la qual dóna lloc a dos corrents de sortida, com a mínim: un d'ells és el corrent del producte, que serà una aigua amb baixa salinitat, i l'altre és el corrent de rebuig, que també s'anomena salmorra, amb el concentrat restant (per tant, amb una concentració salina superior al del corrent d'entrada). Per acabar de definir el procés, cal remarcar que el procés necessita una aportació d'energia externa per dur a terme la separació.

A la figura 6.1. hi ha un diagrama de bloc d'una unitat dessaladora:

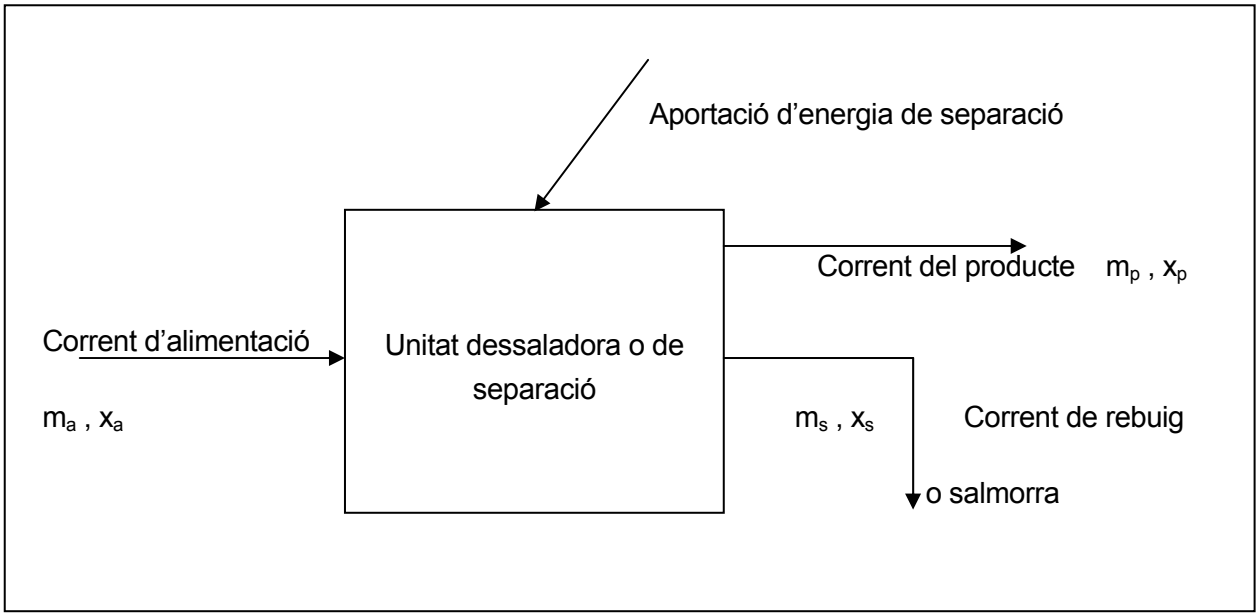


Fig. 6.1. Diagrama bàsic d'un procés de dessalació

Els valors de cadascuna de les variables que hi ha a la figura 6.1. (m i x) representen, respectivament, el cabal i la concentració salina de cadascun dels corrents que participen al

procés. Els subíndexs determinen si la variable pertany al corrent d'alimentació, producte o salmorra.

Des del punt de vista termodinàmic, la dessalació d'aigua s'obté aplicant l'energia necessària per separar les sals que conté, prèviament mesclades en un procés natural.

$$W_{mín} = R \cdot T \cdot \ln a_w \qquad \text{(Eq. 6.1.)}$$

La quantitat mínima necessària per dessalar pot obtenir-se, per tant, seguint el camí invers del procés de dessalació, és a dir, mesurant l'energia que es desprèn en la dissolució de sals en aigua pura, i pot representar-se mitjançant l'equació d'El-Sayed i Silver:

A l'equació 6.1. **[14]** les variables relacionades tenen el següent significat:

$W_{mín}$: energia despresa en el procés de mescla (kWh/m^3)

R: constant universal dels gasos ($R = 0{,}082\ atm \cdot L \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

T: temperatura absoluta de la mescla (en K)

a_w: activitat dels electròlits que composen la dissolució salina, el seu valor és aproximadament 1 per a les aigües marines

Com que l'activitat depèn fortament de la concentració dels electròlits (és directament proporcional a la molalitat dels constituents tant iònics com no iònics), l'energia mínima despresa en el procés i per tant la necessària per dessalar depèn de la concentració de l'aigua que s'aporta: per a una aigua bruta del mar de 35 mil ppm de TDS (total de sòlids dissolts), l'esmentada energia a 25 ºC és de 0,88 kWh/m^3, però baixa fins els 0,3 kWh/m^3 en el cas d'una concentració de 15 mil ppm. **[14]** No obstant, l'energia total emprada, finalment, depèn del rendiment de la planta dessaladora, i oscil·la entre els 3 i 4,5 kWh/m^3, com es pot veure a la figura 8.6.

Existeixen dos tipus principals de processos actualment:

- Els processos tèrmics, que inclouen un canvi de fase: La dessalació tèrmica va ser la primera en fer-se servir, ja a l'antiga Grècia, a les seves naus. Aquest tipus de dessalació consisteix en evaporar aigua salada per tal d'obtenir aigua pura, i això és molt poc eficient energèticament, ja que es necessiten 2258 kJ/kg, el que suposa 0,267 kWh/kg, el que provoca un cost molt elevat per kg d'aigua dessalada. La gran evolució es va produir durant els anys 1950-1960 amb el

descobriment de les cambres flash en sèrie. Per tant, els sistemes de recuperació d'energia són vitals en aquest procés dessalador.

- Els processos de membranes, que no requereixen canvis de fase: Aquests sistemes són molt més eficients energèticament, degut a l'absència d'un canvi de fase durant el procés. Per tant, aquesta mena de processos són molt emprats en països on l'energia té un preu elevat, com és el cas de l'Estat espanyol.

A la figura 6.2. es poden observar, a grans trets, les diferències més importants entre cadascun dels dos tipus de processos de dessalació que hi ha actualment:

Sistema	*Processos tèrmics*	*Processos de membranes*
Temperatura de treball	Alta	Ambient
Pressió de treball	Atmosfèrica o buit	Alta – Ambient
Consum principal d'energia	Vapor (evaporació)	Electricitat (bombeig-electròlisi)
Qualitat de l'aigua d'alimentació	Aigua del mar	Tot tipus, processos molt sensibles al tipus d'alimentació
Qualitat de l'aigua producte	Molt bona	Mitjana - bona

Fig. 6.2. Trets fonamentals dels dos grans processos de dessalació

Hi ha altres maneres de classificar els processos de dessalació d'aigües:

- Pel tipus d'aigua d'alimentació: ja sigui aigua del mar, salobrosa, industrial, o fins i tot, aigua residual.

- Per les condicions de treball (pressió i temperatura): poden ser les ambientals o d'altres més elevades, com es pot veure a la figura 6.2.

- Per les fonts d'energia emprades: que poden ser vapor de calefacció, o energia elèctrica o mecànica per moure motors elèctrics o bombes.

Els tipus principals de dessalació apareixen a la figura 6.3.:

Classificació del procés	*Procés*	*Energia requerida*
Amb canvi de fase	MSF (evaporació multietapa)	Energia tèrmica (calor)
	ME (evaporació multiefecte)	Energia tèrmica (calor)
	TVC (termocompressió de vapor)	Energia mecànica o calor
	Destil·lació solar	Energia tèrmica (calor)
	Congelació	Energia tèrmica (amb cristal·lització)
	Formació d'hidrats	Energia tèrmica (amb cristal·lització)
	Destil·lació amb membranes	Energia tèrmica (prèvia filtració)
	CV (compressió de vapor)	Energia mecànica
Sense canvi de fase (processos de membranes)	OI (osmosi inversa)	Energia mecànica
	ED (electrodiàlisi)	Energia elèctrica
	Intercanvi iònic	Energia química

Fig. 6.3. Classificació dels principals processos de dessalació

A més d'aquests processos, hi ha un cas particular de plantes dessaladores. Són les anomenades plantes duals, que produeixen aigua dessalada i electricitat de forma simultània. Aquestes instal·lacions consisteixen en una combinació de central termoelèctrica per a producció d'electricitat, i evaporadors que permeten dessalar aigua. Les plantes duals són un cas concret dels sistemes de cogeneració d'energia, també anomenats sistemes d'energia total (SET). L'interès d'aquestes instal·lacions rau bàsicament en el fet que presenten una alta eficiència energètica, permetent un millor aprofitament de recursos.

Com es pot veure a la figura 6.3., hi ha moltes variants de processos dessaladors, **[34]** però pràcticament es poden agrupar de la manera que s'ha fet a l'esmentat quadre. Els processos

de membranes, sense canvi de fase, són els més emprats actualment, com ja s'ha dit, i són els que s'estudiaran amb més profunditat, durant el disseny de les plantes de dessalació, que té lloc al capítol 7.

A l'apartat E.1. de l'Annex hi ha un estudi detallat dels processos de dessalació amb canvi de fase.

6.2. Estudi de l'osmosi inversa

L'osmosi inversa és el procés de membranes més important que hi ha. Aquest mètode està en període de creixement i expansió a tot el món, i és el més emprat a Espanya per a dessalar aigua.

L'avenç d'aquesta manera de dessalar aigua converteix l'osmosi inversa en el procés hegemònic i en clar creixement a l'Estat espanyol i al món occidental. Actualment, hi ha nous estudis per poder augmentar la capacitat de producció de les plantes que funcionen amb aquest mètode, així com s'estan analitzant nous tipus de membranes, dotant-les de més superfície de filtració, i per tant, més productivitat, així com d'un rebuig més gran de sals. Amb aquestes membranes, anomenades ja d'última generació, es busca millorar tant la quantitat com la qualitat de l'aigua dessalada per osmosi inversa.

Altres innovacions que s'estan posant en marxa són la reducció del consum energètic, per tal d'abaratir costos; la construcció de noves bombes d'alta pressió, amb nous i millors materials, la incorporació de membranes que puguin suportar pressions superiors a 70 bar, per poder així augmentar la conversió i el rendiment de la planta dessaladora, o bé la substitució de les tradicionals turbines de contrapressió per turbines Pelton, que tenen millor rendiment, i assolir així nous sistemes de recuperació d'energia que redunden en l'eficiència de la instal·lació.

6.2.1. Conceptes bàsics

L'osmosi és un procés físic natural, que intervé especialment en la vida dels animals i les plantes. Es un fenomen natural que té lloc quan dues solucions amb diferents concentracions d'una substància s'uneixen mitjançant una membrana semipermeable, és a dir, que permet el pas de l'aigua a través d'ella, però no pas de la substància en diferent concentració a les dues solucions (en el cas de la dessalació, aquesta substància serà la sal). En aquest cas, una part de la solució d'aigua dolça (amb baixa concentració de sals) passarà a través de la membrana semipermeable a la solució salina. Per tant, es produeix un flux espontani d'aigua des de la solució diluïda cap a la solució més concentrada.

Suposant que el nivell inicial de les dues solucions sigui el mateix, aquesta transferència de matèria de la solució diluïda a la concentrada ha provocat una diferència del nivell entre les dues aigües, que es tradueix en una diferència de pressió, que s'anomena pressió osmòtica.

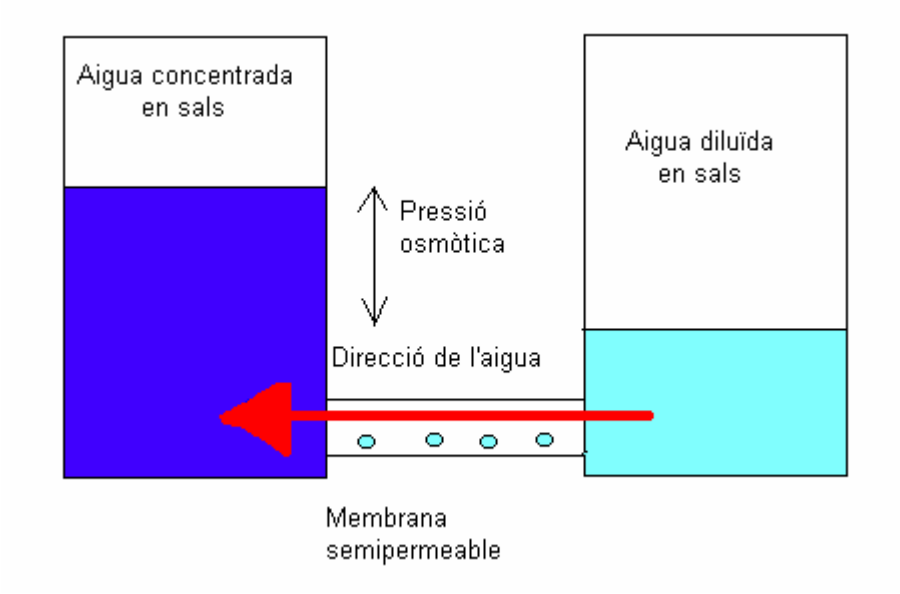


Fig. 6.4. Esquema del fenomen natural de l'osmosi

A la figura 6.4. s'explica amb un esquema senzill el funcionament d'aquest procés natural. Com es pot veure, la diferència de nivell que s'ha produït entre les dues solucions marca la pressió osmòtica, que serà la que cal vèncer si es vol realitzar el procés contrari. La tendència natural és a equilibrar les concentracions, donat que la solució diluïda, amb menys aigua, augmentarà la seva concentració de sals; i la solució concentrada, amb més aigua, quedarà més diluïda, i per tant, la seva concentració disminuirà.

En aplicar, doncs, a la solució salina, una pressió externa superior a l'osmòtica, té lloc el fenomen oposat, conegut com a osmosi inversa, on l'aigua passarà en direcció contrària a través de la membrana, és a dir, circularà de la dissolució més concentrada (que encara augmentarà més la seva salinitat) cap a la dissolució més diluïda, obtenint finalment una aigua més pura i amb una molt baixa concentració de sals.

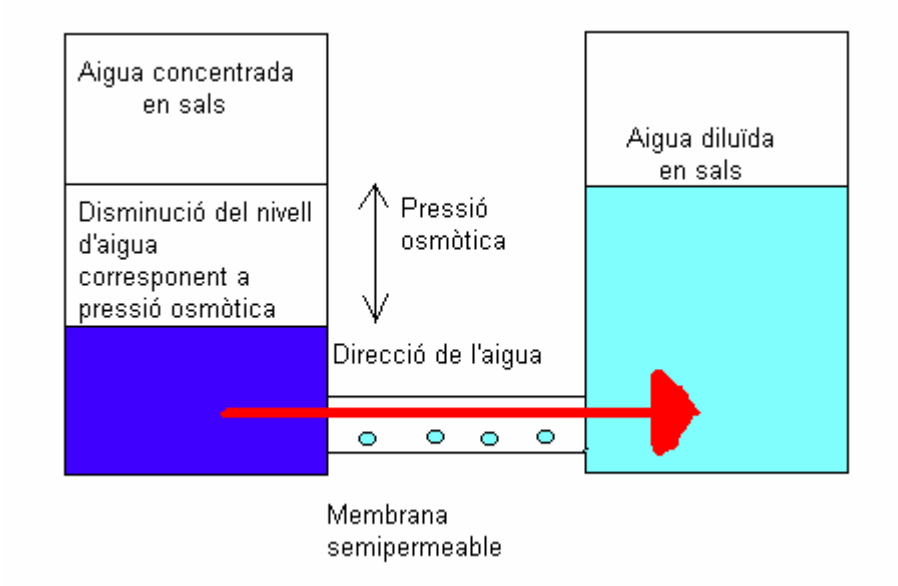


Fig. 6.5. Esquema del fenomen de l'osmosi inversa

A la figura 6.5. es pot observar un esquema simplificat del procés de l'osmosi inversa. Comparat amb la figura 6.4., es pot veure que en aquest cas, l'aigua realitza el recorregut invers. D'aquí prové el nom del fenomen, que és un dels principals mètodes de dessalació.

La pressió osmòtica d'una solució respecte una altra varia segons la concentració de les solucions que intervenen al procés. D'aquesta manera, per exemple, l'aigua del mar amb una concentració de 35000 ppm té una pressió osmòtica de 26,1 bar.

Les membranes, però, han de poder suportar una pressió molt superior al valor de la pressió osmòtica. D'aquesta manera, a l'exemple anterior, calen uns 70 bar per obtenir aigua dessalada.

La quantitat d'aigua dessalada que es pot obtenir depèn de les condicions del procés, com ara la pressió aplicada a la membrana, les propietats d'aquesta i la concentració de l'aigua d'alimentació.

El procés d'osmosi inversa no pot ser considerat com un procés de filtració convencional, a través de la membrana semipermeable, donat que el flux d'aigua en aquest procés transcorre en direcció paral·lela al sistema, i no perpendicular, com tindria lloc en qualsevol altre procés de filtració. Això implica que només una part de l'aigua d'alimentació passa realment a través de la membrana (a diferència d'un altre procés filtrador, on hi passaria tota l'aigua) i que per tant, no s'acumulin sals a la membrana en arrossegar-se per l'aigua bruta que no passa per la membrana.

A l'apartat E.2. de l'Annex s'hi adjunta un estudi detallat dels elements i les etapes d'una planta d'osmosi inversa, dels tipus i les funcions de les membranes d'OI (un element cabdal per al correcte desenvolupament d'aquesta tècnica dessaladora), i dels paràmetres de funcionament d'una planta d'OI. De la mateixa manera, l'apartat E.3. de l'Annex estudia d'altres processos de membrana, com ara l'electrodiàlisi.

6.3. Criteris per a la selecció de tecnologies

De tots els mètodes de dessalació explicats al llarg del capítol E de l'Annex, cal triar els que són més adequats, segons les circumstàncies. En aquest apartat es fa un recull dels criteris per seleccionar els processos més convenients, segons els diferents elements que cal considerar, i també de les tendències actuals del món de la dessalació.

Per triar el procés de dessalació que s'adigui més bé amb les circumstàncies i especificitats de cada cas, tot seguit hi ha un llistat amb cada element que cal tenir en compte, i les consideracions que se n'han de fer al respecte:

6.3.1. Capacitat de producció de la planta

Per dissenyar una planta dessaladora, conèixer-ne la capacitat de producció esdevé un factor cabdal en aquest procés. La selecció del mètode dessalador més adequat, doncs, anirà en funció de la grandària productiva de la planta:

- Plantes petites (menys de 2000 m^3/dia d'aigua dessalada): una tecnologia adient en aquest cas és la compressió de vapor (CV).

- Plantes mitjanes (entre 2000 i 5000 m^3/dia d'aigua dessalada): l'osmosi inversa és un procés adequat per a aquesta grandària. Cal dir, en general, que les tecnologies de membrana tenen una gran adaptació a la capacitat productiva de la planta, raó per la qual poden ser emprades en plantes petites, mitjanes i grans.

- Plantes grans (més de 10000 m^3/dia d'aigua dessalada): els processos amb evaporació, com ara l'evaporació multietapa (MSF) o l'evaporació multiefecte (ME), i també els processos per membranes, com s'ha dit anteriorment.

6.3.2. Aigua d'alimentació

L'aspecte clau de l'aigua d'alimentació per a una planta dessaladora és la seva salinitat, ja que aquesta característica condiciona la tria del procés:

- Aigua de mar: té una salinitat força més elevada que les aigües salobroses o subterrànies, tal i com es pot a la figura 4.3. Les tecnologies d'evaporació i l'osmosi inversa són els dos processos que poden treballar amb aigua marina.

- Aigua salobrosa o equivalent: la seva salinitat és sensiblement inferior a l'aigua del mar. En aquest cas, les tecnologies de membranes (com ara l'osmosi inversa i també l'electrodiàlisi) són els encarregats de dessalar aquest tipus d'aigües. Els processos d'evaporació poden dessalar també aigües salobroses, però aquest fet suposaria un desaprofitament d'una gran quantitat d'energia, i per tant, són inviables econòmicament en aquest cas.

6.3.3. Aplicacions de l'aigua de producte

Segons la destinació que tingui l'aigua producte de la dessalació, caldrà triar els mètodes més adients. A la figura 4.4. hi ha una relació de la qualitat de l'aigua amb processos d'evaporació, i també amb l'osmosi inversa, ja sigui aquesta d'un pas o de dos passos. Les aplicacions de l'aigua són molt diverses:

- Aigua per abastiment públic: Les normatives tant estatal com europea xifren uns valors estàndards de qualitat de l'aigua per a ús públic. El màxim admissible de concentració, en TDS (total de sòlids dissolts) és de 1500 mg/L. Així mateix, la duresa de l'aigua no pot superar els 60 mg/L de Ca^{2+} i la seva alcalinitat no pot ser superior als 30 mg/L de HCO_3^-, com s'ha dit anteriorment. **[15]** Com es pot veure a la figura 4.4., tant els mètodes d'evaporació com l'osmosi inversa, ja sigui aquesta en un o dos passos, compleixen aquestes exigències legals. Malgrat això, les tecnologies d'evaporació són les que obtenen més bona qualitat. En el cas dels sistemes de membranes, s'estableix una exigència de qualitat que fa que la concentració (en TDS) no pugui superar els 400 mg/L. L'osmosi inversa en un pas ja compleix aquestes especificacions. En qualsevol cas, són aptes tant els processos amb evaporació com els de membranes.

- Aigua industrial: Per a molts processos industrials cal que hi hagi una gran qualitat de l'aigua (com ara a la indústria alimentària o de conserves, l'aigua de rentat per a productes agrícoles,...). En aquests casos, cal escollir mètodes d'evaporació, o bé tecnologies de membrana de dues etapes, per augmentar la qualitat de l'aigua. Les aigües de calderes necessiten una elevada qualitat, amb la qual cosa s'empra o bé compressió de vapor (CV), o bé una combinació amb un sistema de membranes (ja sigui osmosi inversa o electrodiàlisi) seguit d'intercanvi iònic per reduir el contingut en ions sodi o magnesi, per evitar posteriors incrustacions. Aquesta darrera combinació, augmentant les etapes del procés de membranes, serà vàlid per una altra indústria molt exigent, com és l'electrònica, on es requereix una aigua de menys d'1mg/L de salinitat.

- Regadius agrícoles: Caldrà tenir en compte la tolerància a la salinitat que presenten els conreus als quals va destinada l'aigua. A l'apartat E.4.3. de l'Annex hi ha un quadre amb dades sobre diferents cultius i la seva tolerància. La majoria de plantes dessaladores destinades a aquest objectiu fan servir com aigües salobroses com a font d'alimentació, raó per la qual es fan servir les tecnologies de membrana, tant l'osmosi inversa com l'electrodiàlisi. Si la font d'alimentació és una aigua residual reutilitzada, de vegades és necessari incloure en el seu tractament instal·lacions dessaladores, que funcionarien amb els mateixos sistemes de membrana esmentats.

6.3.4. Energia

L'energia és un altre factor determinant per dissenyar les plantes dessaladores, ja que aquestes en consumeixen grans quantitats, ja que és necessària per la separació de l'aigua respecte de les sals.

Per triar el mètode més oportú, cal conèixer la disponibilitat de fonts d'energia:

- Vapor: Si es disposa de vapor a baixa pressió, amb un cost relativament assequible, els mètodes de dessalació més convenients són els d'evaporació, com són l'evaporació multietapa (MSF) o l'evaporació multiefecte (ME). Per fer viable la tria, cal que la demanda faci possible la posada en marxa d'una planta dual (que és aquella que proporciona tant aigua dessalada com electricitat). D'aquesta manera, amb els ingressos per la venda d'electricitat, es pot vendre l'aigua a un cost més baix, afavorint així els interessos econòmics relacionats amb la instal·lació. A més, cal que la demanda d'aigua sigui de gran capacitat (almenys equivalent a una planta mitjana), i que les característiques de la turbina de la planta permetin fer l'extracció a una pressió adequada.

- Electricitat: Actualment, el subministrament elèctric arriba gairebé a tot arreu. Per tant, pot fer-se servir qualsevol procés de dessalació en el qual s'empri l'electricitat, com poden ser les tecnologies de membranes (tant osmosi inversa com electrodiàlisi) i també la compressió de vapor (CV).

6.4. Impacte ambiental

Com qualsevol altra activitat, la dessalació comporta uns impactes al medi ambient. Encara que aquestes plantes no provoquen una gran contaminació, alguns elements poden causar perjudicis a l'entorn si no s'actua de manera responsable i prioritzant la conservació del medi natural. Alguns d'aquests impactes s'analitzen en aquest apartat (per ampliar la informació, veure l'Annex E.4.), alguns dels quals estan essent investigats, per tal de minimitzar els efectes negatius de la dessalació.

6.4.1. Abocaments de salmorra

L'abocament de salmorra és el principal impacte mediambiental que genera l'activitat de les plantes dessaladores. Durant el procés de dessalació d'aigua marina, per cada litre que s'extreu del mar, s'obté gairebé la meitat d'aigua dolça (un 45%), i la resta és corrent de rebuig o salmorra (un 55%). A les plantes dessaladores situades a prop de la costa, per tenir així la font d'alimentació més a prop, el corrent de rebuig o salmorra és abocat directament al mar.

La salmorra és un líquid transparent i net, impossible de ser distingit a cop d'ull. Quan és abocada, el mar no augmenta la quantitat de sals, ja que se li retorna part de la quantitat que ja tenia prèviament, però amb menys quantitat d'aigua. Per tant, cal abocar-la de forma que la sal s'acabi diluint el més ràpidament possible amb la massa d'aigua marina.

En els últims anys s'està estudiant l'impacte ambiental que pot produir la salmorra sobre la fauna i la flora dels ecosistemes costaners. Les plantes faneròganes marines són les més afectades per aquests abocaments. Entre aquestes, l'espècie més important és la Posidònia oceànica. **[3]** Es tracta d'una planta que viu a la mar Mediterrània, en la proximitat de les seves costes, i que posseeix un gran valor ecològic, degut a què actua com a fixador del carboni, oxigena l'aigua del mar, protegeix la zona costanera, intervé en la millora de la qualitat de l'aigua de la costa i serveix d'hàbitat i refugi de la biodiversitat, fet que condueix a una millora del desenvolupament dels peixos. A més a més, estabilitza els sediments. D'altra banda, és molt sensible a impactes ambientals, i per això cal extremar les mesures per controlar l'impacte ambiental.

La tolerància màxima de salinitat que presenta la Posidònia oceànica és de 39 g/L. Amb aquest valor fixat, es poden dissenyar solucions per tal de reduir l'impacte ambiental de la salmorra de rebuig, amb l'objectiu de preservar la integritat ecològica de la costa i de tots els seus elements, com ara la Posidònia.

Per solucionar els problemes derivats dels abocaments de salmorra, aquestes són algunes de les mesures que es poden aplicar:

- Evitar l'abocament de salmorra en comunitats ecològiques de gran valor ambiental: És una mesura encaminada a evitar que la salinització afecti els ecosistemes marins, i singularment, la Posidònia oceànica. Aquest és el cas de les plantes dessaladores situades a Alacant i Palma de Mallorca, per exemple. **[5]**

- Maximitzar la dissolució: Es tracta de barrejar el corrent de rebuig o salmorra amb més aigua del mar abans de l'abocament, amb la finalitat de diluir més la seva salinitat. Aquesta mesura s'aplica a les plantes dessaladores de Carboneras, a Almeria; i Xàbia, al País Valencià, entre d'altres.

Hi ha casos en què aquestes senzilles mesures són més difícils de dur a la pràctica, per la proximitat a pocs metres de la costa de comunitats de Posidònia oceànica. Aquests casos es localitzen a Múrcia i a alguns indrets de les illes Balears. Llavors, la solució passa per distribuir el corrent de salmorra per diversos difusors, de tal manera que en sortir la salmorra i xocar amb la pròpia aigua del mar, produeix una agitació que fa que s'homogeneïtzi en salinitat tota la massa d'aigua que circula pel difusor. **[10]**

6.4.2. Altres impactes ambientals

Hi ha altres abocaments que produeix una planta dessaladora, encara que no de la mateixa importància que l'abocament de salmorra. De fet, el seu volum representa només un 1% del total evacuat. Aquests altres abocaments són els següents:

- Aigua de rentat dels filtres de sorra: Formen una aigua molt carregada de sorra i matèria orgànica, i se sol abocar un cop al dia.

- Productes de neteja de les membranes: La seva freqüència depèn molt del tipus de membrana, però en general es realitza almenys un cop a l'any, amb detergents biodegradables.

- Additius que provenen del pre-tractament o el post-tractament de l'aigua: És possible trobar algun anti-incrustant, floculant o anti-corrosiu a l'aigua de rebuig o salmorra. Com que són poc degradables, han de ser controlats de manera periòdica.

A més a més dels abocaments, hi ha més impactes ambientals relacionats amb les plantes de dessalació, com ara les emissions de gasos a l'atmosfera, que aquestes instal·lacions provoquen, ja consumeixin energia elèctrica com tèrmica. Els gasos emesos són el CO_2 i els òxids de nitrogen (NO_x), perjudicials per al medi ambient. L'impacte associat no és gaire gran, però de tota manera s'estan buscant altres vies, com ara les energies renovables, per mirar d'evitar aquesta contaminació. La contaminació acústica és un altre impacte ambiental associat a les plantes dessaladores.

Finalment, hi ha altres impactes ambientals, no tan directes, però que poden tenir una incidència notable en la societat. El més destacat és el que es deriva del fet que una major disponibilitat de recursos hídrics a un indret determinat, fruit de la dessalació, pot estimular el creixement de la població, amb els impactes associats que aquest esdeveniment pot comportar. Per això, i per mirar de frenar una major pressió demogràfica, la millor manera de reduir aquests impactes és actuar sobre l'actual demanda de recursos hídrics.

7. Disseny de plantes de dessalació

En aquest capítol, es proposa el disseny de diferents models de plantes dessaladores, en línia amb l'estudi de noves propostes per l'obtenció d'aigua potable i aigua per a l'agricultura, fent servir tecnologies de membrana. Al cas 1, es fa servir l'osmosi inversa amb aigua del mar, i al cas 2 és l'aigua salobrosa la font d'alimentació de la planta d'OI. Aquests dissenys seran comparats, tant a nivell tècnic, com mediambiental i econòmic.

Al capítol H de l'Annex, a mode d'explicació, es fa referència a una altra tecnologia de membrana: el procés d'electrodiàlisi reversible (EDR) **[15]**.

7.1. Cas 1: Integració de la cristal·lització a l'osmosi inversa amb aigua marina

7.1.1. Presentació del problema

Es vol dissenyar una planta dessaladora de gran capacitat, per abastar una àrea metropolitana densament poblada. La seva finalitat és dessalar i fer apta per al consum humà, principalment domèstic, però també agrícola, l'aigua d'alimentació amb la qual es proveirà la instal·lació. Les grans quantitats que es fan servir determinen que el tipus d'aigua que s'ha de dessalar sigui aigua marina, degut a la seva molt superior presència, en comparació amb l'origen salobrós o subterrani, per exemple.

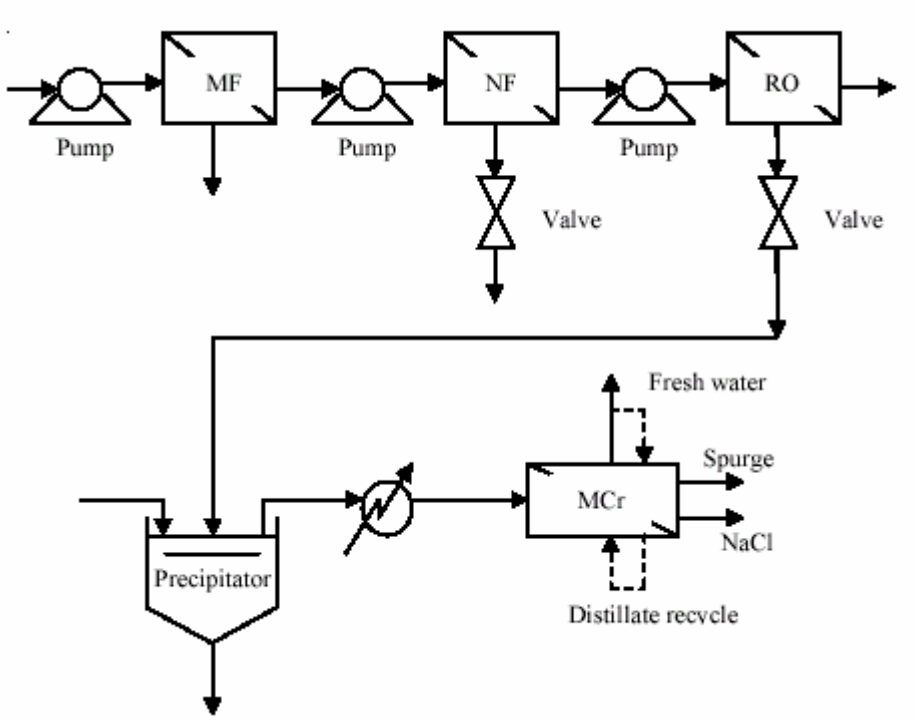
Es decideix que la grandària de la planta tindrà una capacitat aproximada de 10 hm^3/any, aproximadament igual a la dessaladora de la Tordera, **[33]** situada a prop de Blanes, tal i com s'apunta a l'Annex B.3. Això és aproximadament 1140 m^3/h, o el que és el mateix, 27360 m^3/dia.

Aquest primer cas integra unitats de cristal·lització i nanofiltració als mòduls d'osmosi inversa, amb la finalitat d'incrementar la qualitat i la quantitat d'aigua dessalada, d'augmentar l'eficiència de la planta, i tot això amb un cost que faci viable la seva instal·lació.

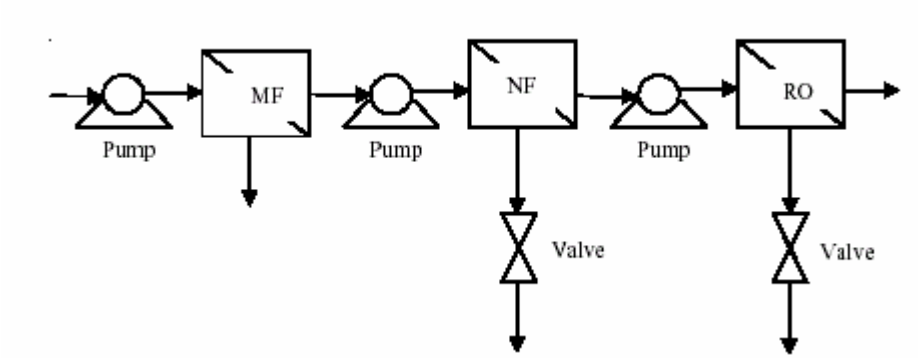
7.1.2. Decisió entre alternatives

Hi ha diferents diagrames de flux o "flowsheets" possibles per introduir la cristal·lització a una planta d'osmosi inversa. Aquestes són algunes de les possibilitats:

Opció A:



Opció B:



Opció C:

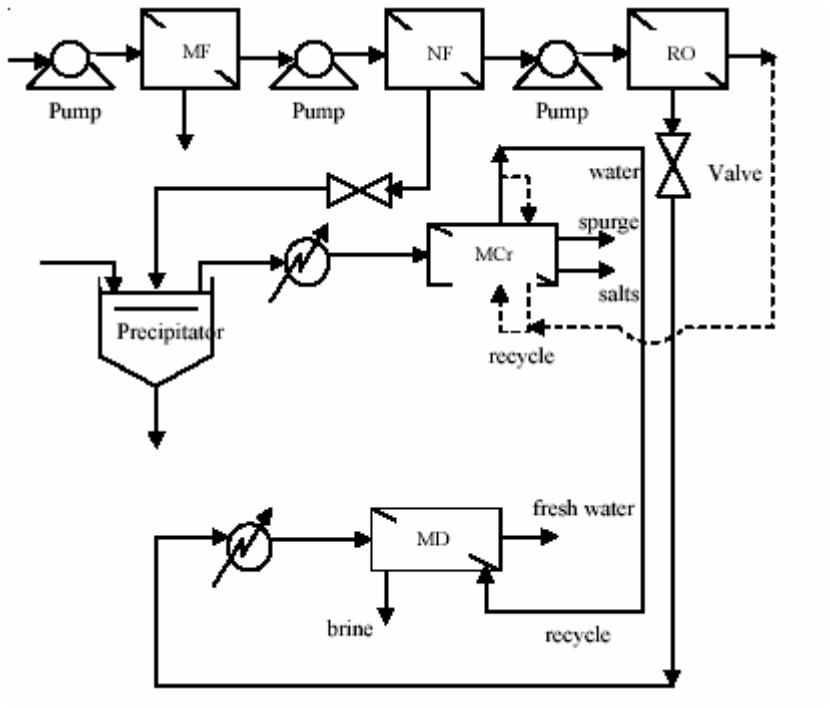


Fig. 7.1. Diagrama de procés de diferents alternatives d'integració de la cristal·lització i la nanofiltració en un sistema de dessalació

Com es pot veure a la figura 7.1., hi ha diverses opcions per dissenyar la planta dessaladora. L'opció C representa un diagrama molt complex, amb dos mòduls de cristal·lització, un procés de destil·lació per membranes (MD, veure Annex E.1.) i vàries recirculacions. Aquesta planta suposarà un alt cost d'inversió, amb la conseqüent despesa energètica provocada pels nombrosos mòduls i equips presents en la instal·lació. D'aquesta manera, tot i proporcionar un gran rendiment a la planta i una gran qualitat de l'aigua, la despesa econòmica no la fa el projecte més aconsellable per activitats com ara l'agricultura, en la qual el cost de l'aigua és un factor fonamental en la viabilitat de l'aigua obtinguda per dessalació, per sobre de la qualitat de l'aigua obtinguda, que en general, per a l'activitat agrícola, no acostuma a ser massa exigent (tret d'alguns casos aïllats de cultius específics).

D'altra banda, l'opció B representa una opció ja clàssica, amb la incorporació només de la nanofiltració al sistema dessalador. Aquesta integració de tecnologies té uns efectes positius pel que fa als resultats obtinguts de la qualitat de l'aigua, però no té en consideració l'aportació de l'efecte de la cristal·lització (MCr a la figura 7.1.).

7.1.3. Proposta de solució

L'opció A, doncs, serà l'escollida, ja que, d'una banda, integra la cristal·lització i la nanofiltració en el procés de dessalació. Els avantatges d'aquest fet van des de la millora substancial del rendiment de la planta d'osmosi inversa, amb el conseqüent benefici econòmic, fins a la millora en la qualitat de l'aigua i la minimització del problema dels abocament de salmorra al mar. D'altra banda, la major inversió econòmica que caldrà realitzar (en tot cas, molt menor que en l'opció C) es veurà compensada per l'eficiència superior de la instal·lació, fet que assegura la viabilitat econòmica del sistema representat per aquesta opció A.

A la figura 7.2. es pot veure el diagrama de flux del procés escollit a l'apartat 7.1.1. Les previsions estan realitzades amb aigua del mar com a font d'alimentació. El corrent d'aigua marina extret del mar representa el corrent 1, que es fa passar seguidament per una bomba de baixa pressió amb l'objectiu d'assolir el valor de pressió adequat per a ser tractat a l'equip de microfiltració, que apareix a la figura 7.2. com a MF (veure l'etapa del pre-tractament de l'apartat E.2.2. de l'Annex), el qual no treballa a pressions tan elevades com els sistemes de nanofiltració i osmosi inversa, i que té l'objectiu principal d'eliminar els sòlids suspesos a l'aigua d'alimentació, a més de reduir l'embrutiment d'aquesta aigua, per millorar després el funcionament de les membranes d'osmosi inversa.

El corrent 4 de rebuig és el ric en aquestes substàncies suspeses a l'aigua, i el corrent filtrat 3 passa tot seguit per una altra bomba de pressió, que es col·loca sempre davant de qualsevol equip de filtració per assolir la pressió de treball òptima d'aquests equips.

El següent equip pel qual passa el corrent d'aigua del mar és l'equip de nanofiltració, que apareix com a NF a la figura 7.2. (veure apartat E.3.2. de l'Annex). L'objectiu d'aquest pas és reduir dràsticament la terbolesa, els microorganismes i la duresa de l'aigua, així com la majoria dels ions multivalents, que són més petits que els ions monovalents. Aquests últims no són eliminats per la nanofiltració, però pot reduir la seva presència a l'aigua, amb una intensitat que, depenent de les propietats de la membrana que es faci servir, pot anar del 10 al 50% de reducció.

Com a conseqüència dels processos de pre-tractament aplicats, la pressió osmòtica del corrent d'entrada a l'equip d'osmosi inversa disminuirà, fet que suposarà una major eficiència i rendiment del procés dessalador. Després de passar per l'equip de nanofiltració, hi ha dos corrents sortints: un d'ells seguirà el procés dessalador, i l'altre, el corrent de rebuig, després de passar per una vàlvula per disminuir-li la pressió (corrent 15), anirà a parar a un precipitador, del qual se'n parlarà més endavant.

El corrent que surt de la nanofiltració per ser dessalat passa per la bomba d'alta pressió que precedeix l'equip d'osmosi inversa (OI) del procés (veure apartat E.2.2. de l'Annex). Allà, té lloc la separació de l'aigua respecte les sals que conté (amb una pressió gran per poder dur a terme l'osmosi inversa). En surten dos corrents. El corrent 9 és el de rebuig, i després de passar per una vàlvula per recuperar la pressió atmosfèrica, surt com a residu.

El corrent 8 és el corrent de l'aigua producte. Aquest corrent pot ésser recirculat a través d'un equip de cristal·lització per membrana (MCr). Aquesta tècnica és un desenvolupament recent del mètode de destil·lació per membranes (veure apartat E.1.3. de l'Annex), i és un sistema innovador per aconseguir un gran rendiment i eficiència en la producció d'aigua dessalada, combinat amb l'obtenció d'un producte secundari, com són les sals sòlides. A causa d'aquest fet, aquesta tecnologia innovadora fa servir l'evaporació de massa transferida a sòlids volàtils a través de membranes microporoses hidrofòbiques amb l'objectiu de concentrar la solució d'alimentació per sobre del seu límit de saturació, arribant a aconseguir cristalls que puguin nuclear-se i créixer.

Quan una unitat de cristal·lització per membranes segueix a una unitat de nanofiltració i d'osmosi inversa, el corrent de salmorra altament concentrat (el corrent 15 del qual es parlava anteriorment) no representa un residu desaprofitable, ja que les sals presents en aquest corrent poden cristal·litzar, tot nucleant-se i creixent el seu gra. Aquest és el cas del diagrama de flux de la figura 7.2.

Aquest corrent passa per un precipitador, en el qual també s'hi afegeixen agents precipitants, com ara l'amoníac (corrent 16), que reacciona amb els ions presents al corrent de salmorra, tot precipitant formant noves sals. El corrent 17 està format pel líquid que s'haurà aïllat dels sòlids separats al corrent 18, com poden ser les sals d'hidròxid de magnesi ($Mg(OH)_2$).

Aquests, després d'ésser sotmesos a un augment de temperatura gràcies a un intercanviador de calor, i anant a l'equip de cristal·lització per membrana, formant la major part d'ells òxid de magnesi (MgO), per deshidratació d'una molècula d'aigua de l'hidròxid de magnesi. Es poden formar més sals, a més de l'hidròxid de magnesi i el seu òxid, i totes elles quantitativament es consideren dins de les sals obtingudes.

D'aquesta manera, s'obtenen més sals sòlides com a subproducte (MgO amb restes de $Mg(OH)_2$), **[55]** tot aprofitant la salmorra de rebuig. Aquest subproducte obtingut tindrà molta importància en previsió a la seva venda, ja que dels beneficis que se n'obtinguin es pot rendibilitzar econòmicament el procés, compensant així el baix preu de venda de l'aigua dessalada per fer-la competitiva al mercat.

De l'equip de MCr en sortirà, doncs, l'aigua dolça com a producte, un cop recirculada, i les sals sòlides que s'obtindran com a subproducte. També hi haurà un corrent de rebuig, el

corrent 12, format per la resta de petites substàncies que no siguin les sals presents a l'aigua.

El procés de cristal·lització, doncs, tindrà avantatges no només de major recuperació d'aigua producte o més eficiència, sinó que també aportarà criteris mediambientals més respectuosos amb l'entorn, amb la reducció significativa de la quantitat de salmorra de rebuig, ja que gran part d'aquesta s'haurà convertit en sals, útils per qualsevol altre procés industrial o químic.

A la figura 7.2., doncs, es pot veure tot el procés tot just explicat.

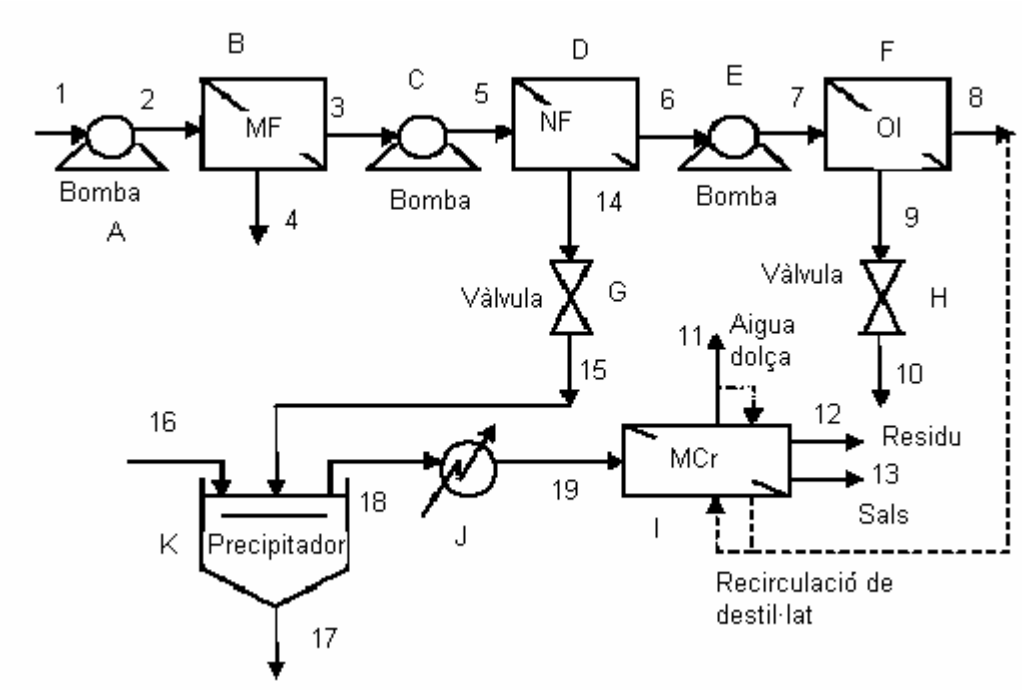


Fig. 7.2. Diagrama de flux del procés de dessalació caracteritzat per la integració de la cristal·lització a l'osmosi inversa

7.1.4. Matriu de components associada

La matriu de components del procés representat a la figura 7.2. es presenta a continuació. Cal tenir en compte que s'han realitzat algunes simplificacions, amb l'objectiu de facilitar els càlculs, sense alterar els fonaments del procés.

La més destacada d'aquestes simplificacions fa referència a la recirculació de destil·lat de l'equip de cristal·lització per membranes. D'aquesta manera, es menysprea l'efecte quantitatiu de l'esmentat fenomen, i per tant, els corrents d'entrada a l'equip de MCr són la 8

(que procedeix de l'equip d'osmosi inversa) i la 19 (que procedeix de l'escalfador que hi ha després del precipitador).

Les sals que s'han considerat en aquest diagrama de flux, les que hi són presents a l'aigua marina, són, a més del clorur de sodi (NaCl, la sal comuna), el carbonat de calci ($CaCO_3$), i el sulfat de magnesi hidratat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Els percentatges en què són presents aquestes sals són aproximats (80% NaCl, 10% $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ i 10% $CaCO_3$). L'aigua dessalada ha de tenir uns mínims de qualitat (veure figura 6.13.). La concentració de Ca^{2+} determina la duresa de l'aigua; i la concentració de HCO_3^- marca la seva alcalinitat. Ambdós valors no poden excedir uns valors determinats per la llei, tal i com es comenta a la part de post-tractament de l'apartat E.2.2. de l'Annex.

Com s'ha dit al punt 7.1.1., la producció d'aigua dessalada és d'aproximadament 1140 m^3/h. L'eficiència del disseny de la planta serà de més del 70%, gràcies a la seqüència d'equips de nanofiltració, osmosi inversa i cristal·lització per membranes. Per tant, es considera que el corrent 1 serà de 1630 m^3/h.

També es realitza la simplificació de la densitat, considerant el valor de la densitat de l'aigua pura destil·lada (1000 kg/m^3) i menyspreant d'aquesta manera la diferència provocada per la presència de sals en aquesta aigua marina.

D'aquesta manera, es parteix amb un flux del corrent 1 d'entrada d'aigua d'alimentació de $1630 \cdot 10^3$ kg/h en total, amb 31500 ppm de salinitat en TDS, tenint en compte els valors de salinitat de la mar Mediterrània, tal i com es pot veure a la figura 4.1.

Els materials de construcció dels equips més adequats a les circumstàncies són els d'acer inoxidable, degut a la presència d'aigua salada, amb clorurs i altres espècies que així ho aconsellen. La figura 7.3. mostra la matriu de components del procés, amb xifres aproximades. Per facilitar els càlculs, s'ha optat per deixar indicat el factor multiplicador $\cdot 10^3$. Els càlculs detallats més significatius, i les suposicions que s'han realitzat són mostrats a l'apartat 7.1.5. i a l'Annex, al seu apartat F.1.

Component → Corrent ↓	Aigua (kg/h) $\cdot 10^3$	NaCl (kg/h) $\cdot 10^3$	$CaCO_3$ (kg/h) $\cdot 10^3$	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (kg/h) $\cdot 10^3$	Agent Precipitant (NH_3) (kg/h) $\cdot 10^3$	Sals obtingudes (MgO i $Mg(OH)_2$) (kg/h) $\cdot 10^3$	Residus o sòlids suspesos (kg/h) $\cdot 10^3$	Flux Total (kg/h) $\cdot 10^3$	P (bar)	T (ºC)
1	1563	41	5	5	-	-	16	1630	1	25
2	1563	41	5	5	-	-	16	1630	4	25
3	1485	39	5	5	-	-	2	1536	4	40
4	78	2	-	-	-	-	14	94	4	40
5	1485	39	5	5	-	-	2	1536	10	25
6	1307	33	1,2	0,5	-	-	0,2	1342	10	40
7	1307	33	1,2	0,5	-	-	0,2	1342	69	25
8	1046	0,34	0,012	-	-	-	-	1046	69	85
9	261	32,7	1,188	0,5	-	-	0,2	296	69	85
10	261	32,7	1,188	0,5	-	-	0,2	296	1	25
11	1064	0,34	0,012	-	-	-	-	1064	1	25
12	-	-	-	-	-	-	2	2	1	25
13	-	-	-	-	-	29,8	-	29,8	35	800
14	178	6	3,8	4,5	-	-	1,8	194,1	10	40
15	178	6	3,8	4,5	-	-	1,8	194,1	1	25
16	-	-	-	-	15,5	-	-	15,5	1	25
17	160	-	-	-	-	-	-	160	1	30
18	18	-	-	-	-	29,8	1,8	49,6	1	30
19	18	-	-	-	-	29,8	1,8	49,6	1	95

Fig. 7.3. Matriu de components del procés de dessalació caracteritzat per la integració de la cristal·lització a l'osmosi inversa

La figura 7.3. mostra la matriu dels components del procés i els seus corrents, amb la seva respectiva temperatura i pressió.

L'aigua obtinguda com a producte del procés dessalador, representada al corrent 11, encara conté restes de sals. A l'apartat següent i a l'Annex F.1. s'han fet els càlculs que han portat a xifrar la salinitat d'aquesta aigua producte en 337,6 ppm. Aquest és un valor aproximat, subjecte a les suposicions i aproximacions numèriques que s'han anat seguint al llarg del procés.

En qualsevol cas, tal i com es pot veure a l'apartat 6.3.3., aquest valor compleix la normativa legal per als processos d'osmosi inversa, que xifra en 400 ppm el límit màxim tolerable per a la bona qualitat de les aigües resultants. També la duresa de l'aigua i la seva alcalinitat estan molt per sota dels valors màxims legals establerts. Per tant, se certifica la bona qualitat del procés.

La quantitat d'aigua producte, en m^3/dia, és la següent:

$$1064 \cdot 10^3 \frac{kg}{h} \cdot \frac{24h}{1dia} \cdot \frac{1m^3 aigua}{1000kgaigua} = 25536 \text{ m}^3\text{/dia} \qquad \text{(Eq. 7.1.)}$$

Com es pot veure a l'equació 7.1., la producció d'aquesta planta de dessalació serà gran, seguint la classificació de capacitat d'instal·lacions dessaladores establerta a l'apartat 6.3.1. Com s'ha vist, la producció és lleugerament inferior a la prevista a l'apartat 7.1.1., degut a les característiques del procés, però malgrat això, compleix les previsions requerides.

D'altra banda, el fet de poder aprofitar gran part de la salmorra generada amb aquest mètode per aconseguir sals com a subproducte (com ara l'òxid de magnesi, principalment, amb residus d'hidròxid de magnesi) suposa una minimització de l'impacte ambiental de la instal·lació, ja que part del corrent de rebuig és reaprofitat, i de l'altra els beneficis generats per aquest producte de sals, com s'ha dit a l'apartat anterior.

Les seves aplicacions més importants són a la indústria refractària (que s'encarrega de fabricar refractoris, productes orgànics de difícil descomposició, usats per exemple en la construcció) com a material de farciment, i en la fabricació de magnesi metàl·lic o ciment d'oxiclorurs.

7.1.5. Principals càlculs realitzats

En aquest apartat, es mostren de forma sintètica els principals càlculs realitzats dels corrents més significatius del procés. Per comprovar la relació de càlculs completa, es pot consultar a l'apartat F.1. de l'Annex.

Corrent 1 (aigua d'entrada)

Per trobar la massa dels sòlids dissolts presents al corrent d'entrada 1, de l'aigua d'alimentació, s'agafa la salinitat dels 31500 ppm, que són 31500 mg/L d'aigua dessalada. Fent factors de conversió, s'arriba a la solució:

Massa sals: $31500\frac{mg}{Laigua}\cdot\frac{1Laigua}{1kgaigua}\cdot\frac{1kgsal}{10^6\,mgsal}\cdot 1630kgaigua/h = 51{,}345kgsal/h$ (Eq. 7.2.)

Aigua = 1630 – 51,345 = 1578,65 kg/h aigua. D'aquest valor, una part seran substàncies de rebuig, com ara sòlids suspesos, i que poden representar 15,78 kg/h del total d'aigua, fet que suposaria un 1% sobre el total. Per tant, d'aigua en queda 1562,87 kg/h.

Aquest serà el conjunt del flux de totes les sals:

51,345 kg/h · (80,1 % NaCl) = 41,13 kg/h NaCl (Eq. 7.3.)

51,345 kg/h · (9,71 % $CaCO_3$) = 4,98 kg/h $CaCO_3$ (Eq. 7.4.)

51,345 kg/h · (10,19 % $MgSO_4{\cdot}7H_2O$) = 5,23 kg/h $MgSO_4{\cdot}7H_2O$ (Eq. 7.5.)

La pressió és l'atmosfèrica (1 atm = 1,013 bar); i la temperatura ambient (25 ºC).

Corrent 8 (corrent sortint de l'equip d'OI)

El corrent 8 és el de l'aigua producte, un cop s'ha fet passar per l'equip d'osmosi inversa. Cal tenir en compte, doncs, els valors del rebuig a les diferents sals que encara hi ha, i a la petita quantitat de sòlids suspesos que encara hi ha, i que en aquest pas es considera definitivament menyspreable.

NaCl: 98,95% de rebuig → 32,87 kg/h * 0,0105 = 0,345 kg/h (Eq. 7.6.)

$CaCO_3$: 99,05% de rebuig → 1,245 kg/h * 0,0095 = 0,0118 kg/h (Eq. 7.7.)

$MgSO_4{\cdot}7H_2O$: 99,6% de rebuig → 0,55 kg/h * 0,004 = 0,0022 kg/h (Eq. 7.8.)

L'aigua d'entrada a l'equip d'OI té un flux de 1307 kg/h. Per a què els sistema, globalment, tingui una eficiència del 71,6%, i tenint en compte l'eficiència en el pas de la nanofiltració, el rendiment de l'equip d'OI serà molt elevat, considerant-lo d'un 80%. D'aquesta manera:

Aigua producte = 1307 kg/h * 0,8 = 1045,6 kg/h.

La pressió a la qual treballarà l'equip d'OI se suposa de 69 bar, sensiblement superior a la de la nanofiltració. La temperatura també serà més elevada, d'uns 85 ºC.

Corrent 11 (aigua producte)

El corrent 11 és el corresponent a l'aigua producte, aquell que s'obté com a resultat del procés dessalador. Aquest corrent té una composició molt semblant al corrent d'entrada 8, amb la diferència que l'aigua total present també es veurà incrementada degut a la presència d'aigua en l'altre corrent d'entrada al cristal·litzador per membrana, el corrent 19. D'aquesta manera:

Flux d'aigua producte: 1045,6 kg/h + 17,8 kg/h = 1063,4 kg/h

La quantitat de sòlids suspesos que encara duia el corrent 8 aniran a parar al corrent de residus 12. D'aquesta manera, el corrent 11, el de l'aigua de producte, es considera que surt sense aquestes substàncies de rebuig.

La petita quantitat de sals que duia el corrent 8 se suposa que es manté al corrent 11. Per veure el resultat de la salinitat, cal passar els 0,34 kg/h de NaCl a ppm, d'aquesta manera:

$$0{,}345 \cdot 10^3\, kg/h NaCl \cdot \frac{1h}{1063{,}4 \cdot 10^3\, kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6\, mgNaCl}{1 kgNaCl} =$$

= 324,4 ppm NaCl (Eq. 7.9.)

Es fa de la mateixa manera amb la resta de sals presents, per trobar el TDS (total de sòlids dissolts) del corrent producte:

$$0{,}0118 \cdot 10^3\, kg/h CaCO_3 \cdot \frac{1h}{1063{,}4 \cdot 10^3\, kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6\, mgCaCO_3}{1 kgCaCO_3} =$$

= 11,1 ppm $CaCO_3$ (Eq. 7.10.)

$$0{,}0022 \cdot 10^3\, kg/h MgSO_4 \cdot 7H_2O \cdot \frac{1h}{1063{,}4 \cdot 10^3\, kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6\, mgMgSO_4 \cdot 7H_2O}{1 kgMgSO_4 \cdot 7H_2O} =$$

= 2,07 ppm $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (Eq. 7.11.)

Per tant, sumant la quantitat de les tres sals: 324,4 + 11,1 + 2,07 = 337,57 ppm és el valor del total de sòlids dissolts, que determina la salinitat del corrent de l'aigua producte.

Per últim, es considera que aquest corrent de l'aigua producte estarà a pressió i temperatura ambient.

Corrent 13 (sals de magnesi com a subproducte)

El corrent 13 és el corresponent a les sals que s'obtenen com a subproducte en aquest procés. Se suposa una separació total d'aquestes un cop passades pel cristal·litzador per membranes. D'aquesta manera, en aquest corrent només hi haurà les sals que provenen del corrent 19, és a dir, 29,8 kg/h. A efectes qualitatius, cal tenir en compte que en aquest cristal·litzador, degut a l'escalfament per obtenir les sals sòlides, part de l'hidròxid de magnesi passa a òxid de magnesi (MgO), i per tant el resultat de les sals serà una barreja d'aquestes dues espècies.

La temperatura al cristal·litzador cal que sigui molt elevada per a què tingui lloc aquest procés. D'aquesta manera, es considera que la temperatura de les sals de sortida serà inicialment la mateixa a la qual ha tingut lloc la cristal·lització, aproximadament 800 ºC. La pressió es considera d'un valor aproximat de 35 bar per a aquest procés.

Corrent 18 (sals de magnesi sortint del precipitador)

Al corrent 18 hi haurà principalment les sals que hagin precipitat, producte de l'acció del precipitador. Hi restarà, de tota manera, una mica d'aigua:

Aigua que queda : 178 – 160,2 = 17,8 kg/h d'aigua.

Per trobar les masses de les sals implicades, principalment $Mg(OH)_2$, cal aplicar els següents factors de conversió, partint de les reaccions de l'amoníac:

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4OH$$

$$MgSO_4\ (s) + 2NH_4OH \rightarrow Mg(OH)_2\ (s) + (NH_4)_2SO_4\ (s)$$

Massa $Mg(OH)_2$:

$$15{,}5kg/h \frac{1000gNH_3}{1kgNH_3} \cdot \frac{1molNH_3}{17gNH_3} \cdot \frac{1molNH_4OH}{1molNH_3} \cdot \frac{1molMg(OH)_2}{2molNH_4OH} \cdot \frac{0{,}0583kgMg(OH)_2}{1molMg(OH)_2} =$$

= 26,578 kg/h $Mg(OH)_2$. (Eq. 7.12.)

De la mateixa manera, les sals $MgSO_4$ i NaCl (pels ions clorur que poden formar $MgCl_2$ i que donen lloc també a hidròxid de magnesi) reaccionen amb l'amoníac com a agent precipitador. Aquestes són les seves quantitats:

$$15{,}5kg/h\frac{1000gNH_3}{1kgNH_3}\cdot\frac{1molNH_3}{17gNH_3}\cdot\frac{1molNH_4OH}{1molNH_3}\cdot\frac{1molMgSO_4}{2molNH_4OH}\cdot\frac{0{,}1203kgMgSO_4}{1molMgSO_4}=$$

= 54,84 kg/h $MgSO_4$. (Eq. 7.13.)

Aquesta quantitat és impossible que reaccioni, ja que només hi ha 4,5 kg/h. Per tant, es considera que reacciona tot el sulfat de magnesi en la formació de la sal d'hidròxid de magnesi. De la mateixa manera, tot el clorur present al NaCl i també els ions carbonat del $CaCO_3$ reaccionen i precipiten, donant lloc a sals sòlides. Aquestes, però, seran menyspreables al costat de la sal principal de la mescla, el $Mg(OH)_2$. L'amoníac se suposa que es consumeix tot ell en les reaccions de precipitació.

Per tant, no només hi haurà els 26,6 kg/h de $Mg(OH)_2$ procedents de la reacció directa amb l'amoníac, sinó també la resta de sals reaccionaran fins a complir el balanç de masses del precipitador, de tal manera que el corrent de sals total sumarà (incloent-hi les altres que no siguin l'hidròxid de magnesi) 29,8 kg/h.

El corrent de residus també serà present en aquest corrent. Les dades de pressió i temperatura són les mateixes que les del corrent 17, és a dir, pressió atmosfèrica i 30 ºC.

7.2. Cas 2: Optimització del pre-tractament de l'osmosi inversa amb aigües salobroses

7.2.1. Presentació del problema

Es vol dissenyar, en aquest segon cas, una planta dessaladora per abastar una petita localitat rural, no necessàriament a prop de la costa. Per fer-ho, es vol aprofitar els recursos hídrics en forma d'aigües salobroses subterrànies de l'indret per a ser dessalats i emprats per a usos agrícoles i també domèstics, principalment.

El tipus d'aigua que s'empra, com ja s'ha dit, seran aigües salobroses amb una salinitat aproximada de 5000 ppm. La capacitat de la planta no és gaire gran, ja que la seva producció està destinada al seu ús per part d'aquesta localitat. Es decideix que és de 500 m^3/dia, prenent com a referència la dada que indica que hi ha més de 70 plantes dessaladores amb aquesta capacitat actualment a l'Estat espanyol, sobre tot al sud-est de la

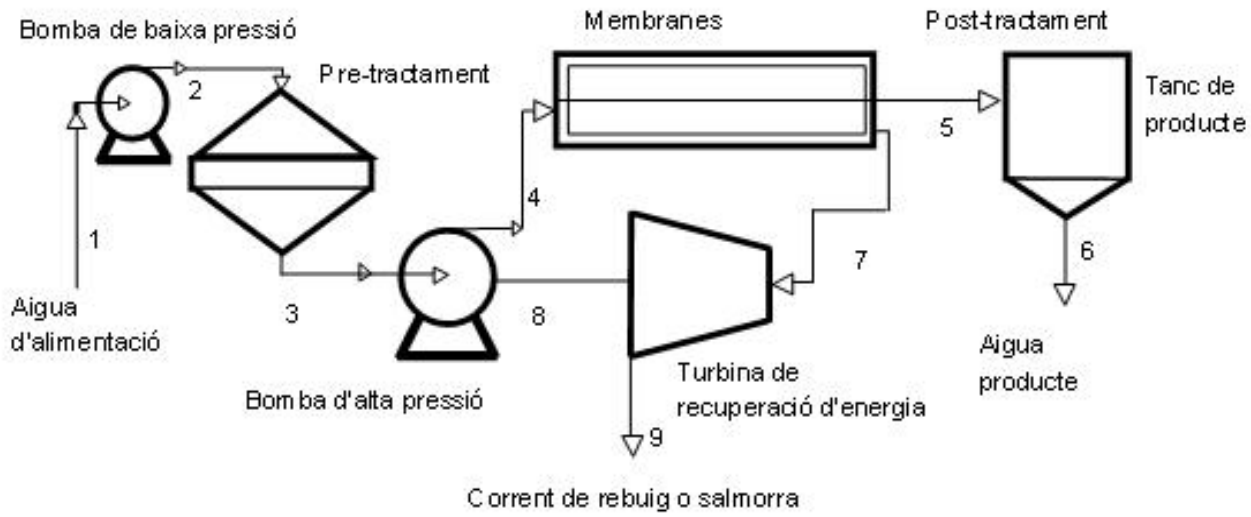
Península, on s'aprofiten les aigües subterrànies salines per a un ús agrícola o urbà, a petita escala.

Es busca l'optimització del procés d'osmosi inversa, integrant al pre-tractament un equip d'ultrafiltració, fent servir aigües salobroses i subterrànies com a font d'alimentació. L'objectiu d'aquest fet és assolir una bona qualitat de l'aigua, de cara a obtenir aigua potable per al consum humà, per a l'agricultura o bé en aplicacions industrials on hi ha uns requeriments de qualitat de l'aigua força alts.

7.2.2. Decisió entre alternatives

Per optimitzar la fase del pre-tractament de l'osmosi inversa, hi ha diferents diagrames de flux que poden resultar vàlids per aquesta finalitat. A la figura 7.4. es poden veure alguns dels esquemes de sistemes de dessalació proposats:

Opció A:



Opció B:

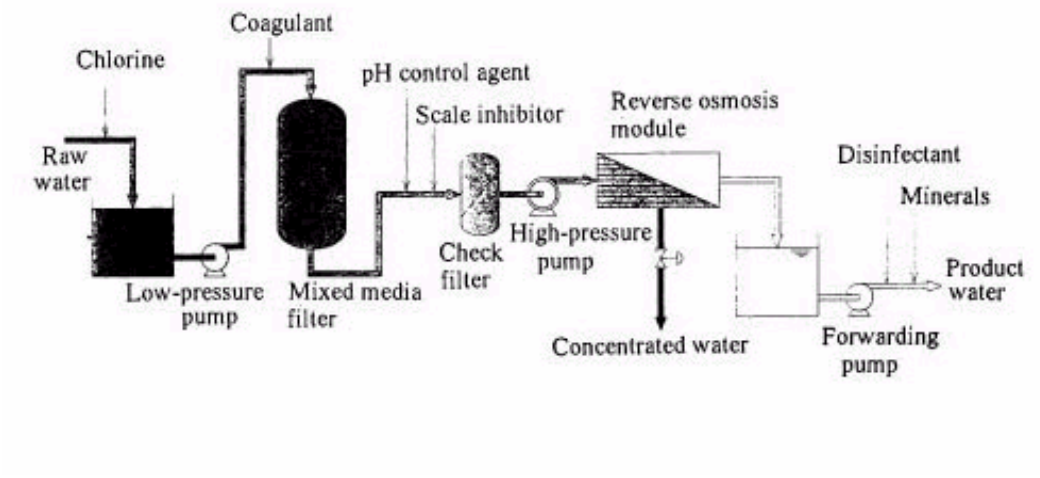


Fig. 7.4. Diagrama de procés de diferents alternatives de sistemes de dessalació fent servir osmosi inversa, amb l'objectiu de la millora del pre-tractament

Com es pot veure a la figura 7.4, hi ha dues alternatives per triar. L'opció A representa el típic esquema d'una planta dessaladora fent servir osmosi inversa, amb una turbina de recuperació d'energia inclosa. En aquesta possibilitat, el pre-tractament és una fase més del procés. L'esquematització del procés estableix una simplificació de la fase de pre-tractament, que és la que es vol millorar en el disseny de la planta dessaladora en aquest segon cas.

Per contra, l'opció B dedica una bona part del diagrama de flux a detallar els equips que participaran durant la fase prèvia a l'entrada de l'aigua al mòdul d'osmosi inversa. Aquesta opció tampoc no incorpora la novetat de la participació del sistema d'ultrafiltració com a manera per aconseguir una qualitat de l'aigua superior.

La ultrafiltració té l'avantatge que les seves membranes eliminen gran part de les substàncies orgàniques que s'incrusten a les membranes d'osmosi inversa i en disminueixen el rendiment. Amb la ultrafiltració integrada dins el pre-tractament, la majoria d'aquestes substàncies no arribaran a l'equip d'OI, augmentant d'aquesta manera el rendiment total del procés.

7.2.3. Proposta de solució

L'opció finalment escollida va en la línia de la representació de l'opció B, però en aquest cas, integrant el procés d'ultrafiltració al pre-tractament del diagrama de flux del sistema. A l'apartat 7.2.2. hi ha el diagrama de flux o "flowsheet" del procés resultant, per a aquest segon cas, on l'objectiu és la millora del pre-tractament de l'osmosi inversa, per millorar la qualitat de l'aigua dessalada obtinguda.

A la figura 7.5. es pot observar el resultat de la integració de l'equip d'ultrafiltració a l'opció escollida a l'apartat anterior. A diferència del cas 1, aquest diagrama de flux del procés incorpora un element important per a l'estalvi energètic de la planta: una turbina recuperadora d'energia (com es pot veure a l'apartat E.2. de l'Annex). En aquest cas, aquesta serà de tipus Pelton (la clàssica, amb una recuperació energètica quantificada al 40%), amb ús més estès.

L'aigua d'alimentació d'aquest procés dessalador és aigua residual salobrosa, que contindrà una quantitat important de microorganismes i altres substàncies que cal eliminar de l'aigua per purificar-la, abans de procedir a la dessalació. El primer que es fa és afegir-hi clor, en forma de clorur de sodi (corrent 2, que després caldrà eliminar durant el procés dessalador), en un tanc d'emmagatzematge, amb l'objectiu de desinfectar aquesta aigua d'alimentació. Tot seguit, es fa passar el corrent sortint 3 per una bomba de baixa pressió, abans d'entrar a un equip de filtració de mescla, encarregat d'agitar i separar les substàncies sòlides suspeses que pugui contenir l'aigua d'alimentació, ja tinguin l'origen aquestes en l'aigua residual que ha entrat, o bé que s'hagin format durant el procés degut a la precipitació de sals com a resultat de l'addició de clor al corrent 1.

El corrent 6 que surt de l'equip de filtració de la mescla estarà lliure de sòlids suspesos i d'agents infectants. De tota manera, el procés dessalador preveu un altre punt de control per assegurar una bona qualitat de l'aigua que posteriorment caldrà dessalar. El corrent 5, per la seva banda, està format pels residus que s'han pogut eliminar durant aquest procés de filtració de mescla. El corrent 6 se sotmet, primerament, al control d'agents reguladors de pH, una acció molt freqüent en el tractament d'aigües residuals o subterrànies, amb la finalitat de prevenir la corrosió de canonades i la dissolució de plom durant el subministrament d'aigua. Si el resultat del control dóna una aigua bàsica, la solució pot consistir en l'addició d'àcid clorhídric (HCl). En canvi, si el líquid és àcid, caldrà afegir-hi una base, com l'hidròxid de sodi (NaOH).

Tot seguit, hi actua la presència d'inhibidors d'escala, que actuen posant fre a la possible activitat biològica o corrosiva que pugui tenir lloc a l'aigua d'alimentació, així com la possible formació de precipitats que s'hagin pogut produir per l'addició de diferents espècies químiques durant el procés de pre-tractament. Alguns exemples d'aquests precipitats, o "crostes", que s'han pogut formar són el carbonat càlcic, el sulfat càlcic o el silicat càlcic. Els inhibidors destorben la formació de cristalls i impedeixen la precipitació de crostes. Alguns exemples d'inhibidors són l'àcid fosfòric, els èsters de fosfat, i també solucions d'àcid poliacrílic de baix pes molecular. El corrent 7 està format per àcid fosfòric, que pot actuar alhora com a inhibidor d'escala i com a regulador de pH, essent aquest un àcid feble.

El corrent 6 és sotmès a l'acció d'un nou equip de filtració, que s'encarrega de filtrar totes aquelles substàncies que hagin pogut quedar després de l'acció dels inhibidors d'escala i els

reguladors de pH, del qual en surt el corrent de residus 9, i un corrent 8, que després de passar per una bomba de baixa pressió, entra a l'equip d'ultrafiltració. Aquest procés s'encarrega d'eliminar totalment la terbolesa causada per l'acció de bacteris, virus i altres microorganismes, purificant i sanejant d'aquesta manera l'aigua, abans de ser tractada a l'equip d'osmosi inversa. D'aquesta manera, s'optimitza el pre-tractament del procés dessalador, aconseguint d'aquesta manera una superior qualitat de l'aigua, a més d'aconseguir una durada superior, i allargar d'aquesta manera els recanvis, una mesura més econòmica.

De l'equip d'ultrafiltració en surt un corrent de residus, el 12, i un altre, el 11, que tot seguit rep l'acció d'una bomba d'alta pressió, en aquest cas, per poder entrar en les condicions adequades a l'equip d'osmosi inversa, on el corrent d'aigua salobrosa és dessalat, amb una gran pressió a l'equip per poder dur a terme aquesta separació de les sals respecte l'aigua. Com s'ha dit anteriorment, l'optimització del pre-tractament facilita la tasca de les membranes d'osmosi inversa, en les quals es reduiran significativament les incrustacions derivades de les substàncies de l'aigua d'alimentació si no és sotmesa a un sistema de pre-tractament correcte.

El corrent 15 que surt correspon al corrent de rebuig o salmorra, que en aquest cas s'aprofita per fer-lo passar a través d'una turbina recuperadora d'energia. Aquesta turbina, suposada com a turbina Pelton (veure apartat E.2.2. de l'Annex) aconsegueix obtenir l'energia que posseeix el corrent de salmorra i recircular-la envers la bomba d'alta pressió, prèvia a l'equip d'OI. En aquest cas, amb aigües salobroses, la pressió a l'equip d'OI serà força inferior al cas 1, amb aigua del mar com a font d'alimentació.

El corrent 14, que surt de l'equip d'osmosi inversa, passa seguidament per un tanc d'emmagatzematge, on se li afegeixen agents mineralitzants (corrent 17, en aquest cas, la sílice o SiO_2) per aconseguir millorar el gust i les propietats de l'aigua producte, que després de passar per una bomba de molt baixa pressió, per assolir la pressió atmosfèrica, surt del procés convertit en el resultat del procés, el corrent 19 del diagrama.

Amb el procés d'optimització del pre-tractament, s'ha millorat sensiblement la qualitat d'una aigua destinada al consum humà, a més de l'estalvi econòmic que suposa evitar al màxim les incrustacions a les membranes de l'equip d'osmosi inversa. A la figura 7.5., doncs, es pot veure tot el procés tot just explicat.

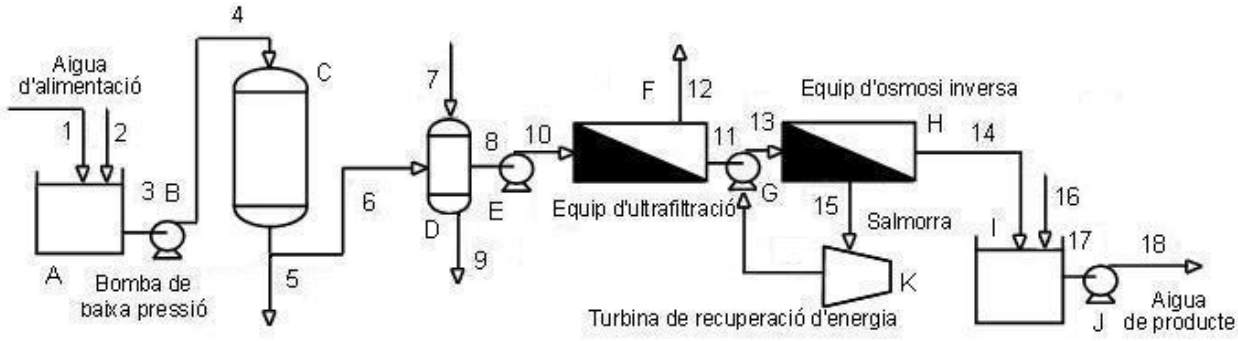


Fig. 7.5. Diagrama de flux del procés de dessalació caracteritzat per l'optimització del pre-tractament a l'osmosi inversa

7.2.4. Matriu de components associada

A la figura 7.6. hi ha la matriu de components associada al procés explicat al llarg de l'apartat 7.2.3. Com en el cas anterior, s'han realitzat algunes simplificacions, per tal de facilitar els càlculs sense alterar el comportament del sistema. La més important d'elles és la simplificació de la recirculació de la salmorra a través de la turbina a efectes quantitatius. Per tant, aquest corrent només es valorarà a efectes energètics. A més, es consideren només aquestes sals presents a l'aigua d'entrada al sistema: NaCl, $CaCO_3$ i $MgSO_4$ (es considera l'espècie deshidratada en aquest cas), suposició també duta a terme al cas anterior, en aquest cas se suposa que amb menys NaCl (68% NaCl, 18% $MgSO_4$ i 14% $CaCO_3$).

Com s'ha dit al punt 7.2.1., la salinitat de l'aigua d'alimentació se situa entorn dels 5000 ppm de TDS (total de sòlids dissolts), i el cabal volumètric de treball, de 500 m^3/dia. Suposant una elevada eficiència de la planta, entorn del 83%, l'aigua d'entrada ha de situar-se en 600 m^3/dia. El flux del corrent d'entrada 1 serà, doncs, de 25 m^3/h.

Els materials de construcció, anàlogament al cas anterior, es consideren d'acer inoxidable per als equips del procés. La densitat s'assumeix de 1000 kg/m^3 per als corrents del procés, simplificant d'aquesta manera la presència de sals. Degut a la inferior magnitud dels càlculs, en aquest cas no cal indicar cap factor multiplicador, a diferència del cas anterior. Els càlculs principals realitzats es poden observar a l'apartat 7.2.5. i de manera completa a l'Annex, al seu apartat F.2.

Component → Corrent ↓	Aigua (kg/h)	NaCl (kg/h)	$CaCO_3$ (kg/h)	$MgSO_4$ (kg/h)	Sílice (SiO_2) (kg/h)	Àcid fosfòric (H_3PO_4) (kg/h)	Residus o sòlids suspesos (kg/h)	Flux Total (kg/h)	P (bar)	T (ºC)
1	22387,5	85	17,5	22,5	-	-	2487,5	25000	1	25
2	2700	300	-	-	-	-	-	3000	1	25
3	25087,5	385	17,5	22,5	-	-	2487,5	28000	1	25
4	25087,5	385	17,5	22,5	-	-	2487,5	28000	3	25
5	-	-	-	-	-	-	2238,8	2238,8	3	35
6	25087,5	385	17,5	22,5	-	-	248,2	25761,2	3	35
7	-	-	-	-	-	500	-	500	1	25
8	25387,5	385	17,5	22,5	-	200	24,9	26037,4	3	35
9	-	-	-	-	-	-	223,8	223,8	3	35
10	25387,5	385	17,5	22,5	-	200	24,9	26037,4	5	40
11	25387,5	385	17,5	22,5	-	200	-	26037,4	5	40
12	-	-	-	-	-	-	24,9	24,9	5	40
13	25387,5	385	17,5	22,5	-	200	-	26037,4	20	25
14	20070	4,1	0,16	0,09	-	-	-	20074,4	20	85
15	5017,5	381	17,34	22,41	-	-	524,9	5963	20	85
16	-	-	-	-	20	-	-	20	1	25
17	20070	5,3	0,48	0,57	18	-	-	20094,4	0,5	25
18	20070	5,3	0,48	0,57	18	-	-	20094,4	1	25

Fig. 7.6. Matriu de components del procés de dessalació caracteritzat per l'optimització del pre-tractament a l'osmosi inversa

A la figura 7.6. es pot observar la matriu dels components del procés i els seus corrents, amb la seva respectiva pressió i temperatura. L'aigua obtinguda com a producte del procés dessalador, representada al corrent 18, conté restes de sals, encara que molt petites. A l'Annex F.2. i a l'apartat següent s'han realitzat els càlculs que han portat a xifrar la salinitat d'aquesta aigua producte en 313,5 ppm, en TDS (total de sòlids dissolts).

Com s'ha dit anteriorment, aquest és un valor aproximat, subjecte a les suposicions i aproximacions numèriques que s'han anat seguint al llarg del procés. El resultat és lleugerament inferior a la salinitat del cas 1. Cal tenir en compte que, en aquest cas, l'aigua d'alimentació és salobrosa, amb menys salinitat que l'aigua marina, i per tant, el resultat obtingut és raonable amb aquesta circumstància.

En qualsevol cas, i anàlogament a l'apartat anterior, aquest valor compleix la normativa legal per als processos d'osmosi inversa, que xifra en 400 ppm el límit màxim tolerable per a la bona qualitat de les aigües obtingudes (tal i com es pot veure a l'apartat 6.2.3.). Una altra semblança entre el cas 2 i l'1 és que la duresa de l'aigua obtinguda i la seva alcalinitat estan molt per sota dels valors màxims legals establerts. Per tant, s'arriba a la mateixa conclusió que amb el cas 1: l'aigua té una qualitat correcta per a l'ús agrícola, domèstic o industrial.

La quantitat d'aigua producte, en m^3/dia, és la següent:

$$20094{,}4\frac{kg}{h}\cdot\frac{24h}{1dia}\cdot\frac{1m^3aigua}{1000kgaigua}=482{,}3\ m^3/dia \qquad \text{(Eq. 7.14.)}$$

Com es pot veure a l'equació 7.17., la producció d'aquesta planta de dessalació serà petita, seguint la classificació de capacitat d'instal·lacions dessaladores establerta a l'apartat 6.3.1., ja que produeix menys de 2000 m^3/dia. En concret, la seva producció és lleugerament inferior als 500 m^3/dia previstos a l'apartat 7.2.1., degut a les característiques pròpies del procés, que concorda amb l'objectiu de la planta dessaladora d'abastar un àmbit reduït. A diferència del cas 1, en aquesta planta no s'obtenen productes secundaris, però sí que es recupera part de l'energia consumida, gràcies a una turbina recuperadora d'energia, en aquest cas tipus Pelton, col·locada a l'entrada del corrent de rebuig o salmorra (corrent 15). Per tant, del total d'energia consumida per la planta, es calcula que un 40% es pot reaprofitar, reduint-se així el consum a un 60% del que hi hauria sense aquest sistema.

7.2.5. Principals càlculs realitzats

Igual que en el cas anterior, seguidament hi ha els càlculs i les suposicions que s'han fet per als corrents més significatius del procés. Per comprovar la relació de càlculs completa, es pot consultar l'apartat F.2. de l'Annex.

Corrent 1 (aigua d'alimentació)

Per trobar la massa dels sòlids dissolts presents al corrent d'entrada 1, de l'aigua d'alimentació, s'agafa la salinitat dels 5000 ppm, que són 5000 mg/L d'aigua dessalada. Fent factors de conversió, s'arriba a la solució:

Massa sals: $5000\frac{mg}{Laigua}\cdot\frac{1Laigua}{1kgaigua}\cdot\frac{1kgsal}{10^6 mgsal}\cdot 25000kgaigua/h = 125kgsal/h$ (Eq. 7.15.)

Aigua = 25000 – 125 = 24875 kg/h aigua. D'aquest valor, una part seran substàncies de rebuig, com ara sòlids suspesos, i que poden representar, en unes aigües salobroses residuals, un 10 % del total, és a dir, 2487,5 kg/h d'aquestes substàncies, degut a la gran presència de residus orgànics que hi ha. Per tant, d'aigua en queda 22387,5 kg/h.

Aquest serà el conjunt del flux de totes les sals:

125 kg/h · (68 % NaCl) = 85 kg/h NaCl (Eq. 7.16.)

125 kg/h · (14 % $CaCO_3$) = 17,5 kg/h $CaCO_3$ (Eq. 7.17.)

125 kg/h · (18 % $MgSO_4$) = 22,5 kg/h $MgSO_4$ (Eq. 7.18.)

La pressió és l'atmosfèrica (1 atm = 1,013 bar); i la temperatura ambient (25 ºC).

Corrent 11 (corrent sortint de l'equip d'UF)

El corrent 11 és el que surt com a resultat del procés de la ultrafiltració. En aquest cas, se suposa que tots els residus i sòlids suspesos que hi havia seran filtrats, menyspreant la quantitat que hi pot quedar present. El procés ultrafiltrador no pot eliminar els ions monovalents ni multivalents, però deixa l'aigua neta de residus abans del seu pas per l'equip d'osmosi inversa. La temperatura de sortida del corrent de l'equip d'ultrafiltració se suposa de 40 ºC, i la pressió, de 5 bar.

Corrent 14 (corrent sortint de l'equip d'OI)

El corrent 14 és molt proper al de l'aigua producte del procés. És el resultat de la dessalació que ha tingut lloc a l'equip d'osmosi inversa. D'aquesta manera, cal tenir en compte el rebuig

a les sals de les membranes d'OI, que són que apareixen seguidament, quedant com al corrent 14 les següents quantitats de sals:

NaCl: 98,95% de rebuig → 385 kg/h * 0,0105 = 4,0425 kg/h (Eq. 7.19.)

$CaCO_3$: 99,05% de rebuig → 17,5 kg/h * 0,0095 = 0,16625 kg/h (Eq. 7.20.)

$MgSO_4$: 99,6% de rebuig → 22,5 kg/h * 0,004 = 0,09 kg/h (Eq. 7.21.)

Cal tenir en compte, a més, l'àcid fosfòric, ja que n'hi ha 300 kg/h en forma d'ions lliures ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} i PO_4^{3-}), que es consideren com a aigua, i que se suposa que precipiten al llarg del procés. D'aquesta manera, aquests ions monovalents i multivalents seran filtrats per l'equip d'OI, quedant el corrent 14 amb 300 kg/h de menys d'aigua, ja que s'havia realitzat aquesta consideració quan s'ha introduït l'H_3PO_4 al sistema.

L'aigua que queda, suposant un rendiment de l'equip d'OI anàleg a l'anterior cas 1, del 80%, el flux d'aigua que resta és: 25087,5 · 0,8 = 20070 kg/h d'aigua restant. La pressió de sortida serà la de treball de l'equip d'OI, 20 bar, i una temperatura de 85 ºC.

<u>Corrent 18 (aigua producte)</u>

El corrent 18 té la mateixa composició que el corrent 17, però després d'haver passat per una bomba de baixa pressió, en aquest cas d'1 bar, per assolir la pressió atmosfèrica. La temperatura és de 25 ºC. D'aquesta manera, s'obté l'aigua producte del procés. Per veure el resultat de la salinitat, cal passar els 0,34 kg/h de NaCl a ppm, d'aquesta manera:

$$5{,}2625 kg/h NaCl \cdot \frac{1h}{20094{,}4 kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6 mgNaCl}{1 kgNaCl} = 261{,}9 ppmNaCl \quad \text{(Eq. 7.22.)}$$

S'opera anàlogament amb la resta de sals presents, per determinar la salinitat del corrent:

$$0{,}466 kg/h CaCO_3 \cdot \frac{1h}{20094{,}4 kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6 mgCaCO_3}{1 kgCaCO_3} = 23{,}2 ppmCaCO_3 \quad \text{(Eq. 7.23.)}$$

$$0{,}57 kg/h MgSO_4 \cdot \frac{1h}{20094{,}4 kgaigua} \cdot \frac{1 kgaigua}{1 Laigua} \cdot \frac{10^6 mgMgSO_4}{1 kgMgSO_4} = 28{,}37 ppmMgSO_4 \quad \text{(Eq. 7.24.)}$$

Per tant, sumant la quantitat de les tres sals: 261,9 + 23,2 + 28,37 = 313,47 ppm és el valor del total de sòlids dissolts, que determina la salinitat del corrent de l'aigua producte.

8. Avaluació econòmica dels costos de l'aigua per dessalar per a ús domèstic i ús en l'agricultura

El cost de l'aigua dessalada és un factor fonamental per determinar la viabilitat del procés de dessalació, en comparació amb altres maneres per augmentar l'oferta d'aigua potable, ja sigui aquesta per a ús domèstic o bé agrícola.

En aquest capítol es divideixen aquests costos en els d'inversió, els necessaris per posar en marxa una instal·lació dessaladora, i els d'explotació, és a dir, aquells derivats del funcionament diari de la planta. Finalment, s'estudia i s'analitza la rendibilitat econòmica dels principals processos de dessalació.

Sovint es comparen els costos de la dessalació amb els relacionats amb altres mesures per pal·liar els dèficits hídrics, com és el cas dels transvasaments, per determinar l'opció econòmicament més viable. En aquest sentit, a l'apartat 4.3. hi ha referències sobre el cost d'ambdós mètodes, i es conclou que el procés més econòmic és la dessalació. A la figura 8.1. es pot comprovar l'evolució del cost de la dessalació en comparació amb l'associat al transvasament de l'Ebre inclòs al projecte del PHN.

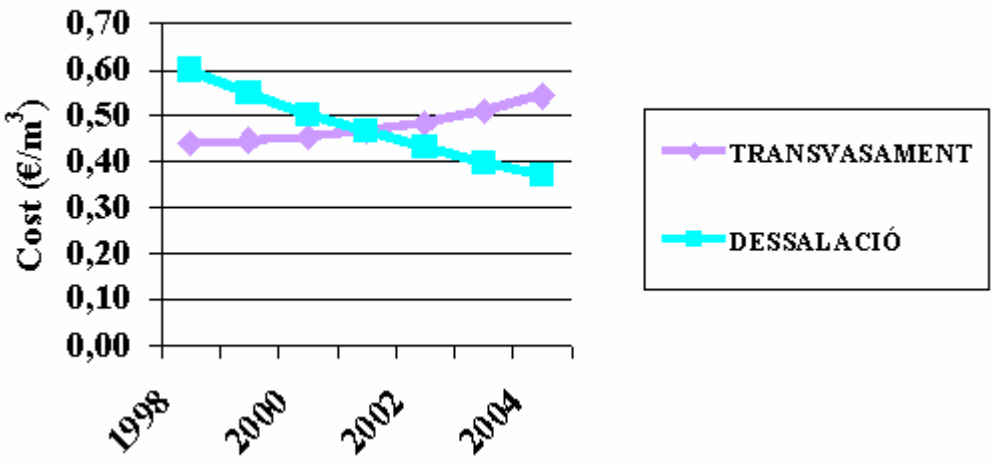


Fig. 8.1. Costos comparats de transvasament i dessalació durant el període 1998-2004 **[3]**

Com es pot veure a la figura 8.1., durant el període 1998-2004 hi ha un descens progressiu del cost de la dessalació que fa que l'any 2002 aquest sigui inferior al del transvasament.

8.1. Costos d'inversió

Els costos d'inversió, també anomenats inicials o de construcció, poden distribuir-se al llarg del cicle de vida de la planta. D'aquesta manera, pot determinar-se un cost anual derivat d'aquesta inversió (amortització), i alhora un cost unitari de producció d'aigua per concepte d'amortització de cost inicial. **[67]**

8.1.1. Components dels costos d'inversió

Els principals components de la inversió inicial per construir una planta de dessalació són els següents:

- Costos directes de construcció: A més a més dels equips de dessalació pròpiament dits, pot ser inclosa la presa d'aigua, l'obra civil, la previsió per a ampliacions, el subministrament d'energia, l'emmagatzematge o regulació d'aigua producte i el sistema de distribució d'aigua.

- Costos indirectes: Aquests inclouen aspectes com ara els interessos de finançament, les despeses de projecte i altres despeses imprevistes.

- Costos no menyspreables: Aquests inclouen la inversió en els terrenys on hi haurà la planta dessaladora, i el capital circulant necessari per la posada en marxa del projecte.

- Costos recurrents: Aquests inclouen les assegurances i els impostos que es paguen anualment.

Els costos directes i indirectes s'amortitzen al llarg del cicle de vida de la planta. El càlcul de l'anualitat es pot realitzar mitjançant la següent expressió:

$$A = C \cdot \left(\frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \right) \qquad \text{(Eq. 8.1.)}$$

A l'equació 8.1.: **[15]**

C: representa el valor dels costos de capital o d'inversió

A: representa el valor de l'anualitat

i: representa la taxa d'interès

n: representa el nombre d'anys d'amortització

L'estimació del període de vida útil és al voltant de 15 anys, sens perjudici que amb freqüència les instal·lacions quedin tècnicament obsoletes en menys temps. Un exemple d'això és el cas de la substitució d'equips per a la recuperació d'energia en plantes que estiguin en ple període de funcionament.

A més, la vida útil de la instal·lació no necessàriament coincideix amb el termini d'amortització des del punt de vista financer, en cas d'haver-se finançat amb crèdits. D'altra banda, és més curta de la vida útil prevista a la Llei d'Aigües de l'Estat per a l'amortització d'obres hidràuliques, que xifra en 25 anys.

8.1.2. Cost i amortització de cada element d'inversió

El cost de cada element d'inversió per a la dessalació és diferent. A la figura 8.2., es pot veure un quadre amb els percentatges de la inversió, i la seva amortització, per a l'aigua marina:

	% Inversió respecte el total	*Període d'amortització (anys)*
Edificació i urbanització	8-12	20
Conduccions	12-16	15
Membranes (neteja inclosa)	25-32	8
Bombeig	15-20	12
Pre-tractament (filtres, additius)	8-10	15
Equips elèctrics	9-13	15
Instrumentació i control	2-4	12
Altres (post-tractament, recanvis)	3-5	15

Fig. 8.2. Proporció de cada element en els costos de la inversió, i la seva amortització per a la dessalació d'aigua del mar **[3]**

Com es pot veure a la figura 8.2., l'element que més inversió requereix per posar en marxa una instal·lació dessaladora és el conjunt de membranes, on ve inclosa la neteja necessària

per al seu correcte funcionament al llarg del temps. Aquests càlculs estan realitzats per tecnologies de membrana, és a dir, per a l'osmosi inversa i l'electrodiàlisi, ambdós mètodes alimentant-se d'aigua del mar. El bombeig i les conduccions de les plantes són altres factors significatius en el conjunt del cost de la inversió que cal realitzar.

En canvi, a la dessalació per aigües salobroses, el cost de la conducció i el bombeig d'aigua s'estableix entorn dels 0,042 i 0,120 €/m^3. **[14]**

8.1.3. Cost de la inversió segons els processos de dessalació

La inversió necessària per posar en marxa una planta de dessalació varia, entre d'altres factors, segons el tipus de procés dessalador emprat.

a) Tecnologies d'evaporació

La inversió que cal realitzar en aquest tipus de plantes ha anat descendint de mica en mica, amb la inclusió de nous materials resistents a la corrosió no tan cars com els acers inoxidables i els aliatges de titani.

Tecnologia d'evaporació	*Inversió (€/m^3/dia)*	*Cost d'amortització (€/m^3)*
MSF	1080 - 1680	0,29 – 0,44
MED - TCV	780 - 1080	0,21 - 0,29
CV	1020 - 1500	0,27 – 0,40

Fig. 8.3. Inversió i cost d'amortització dels principals processos d'evaporació **[14]**

Com es pot veure a la figura 8.3., la inversió més alta dels tres principals processos de dessalació amb evaporació és la corresponent a l'evaporació multietapa (MSF). Els intervals oscil·laran en funció, entre d'altres, de la capacitat de la planta dessaladora. El cost d'amortització està estimat considerant una vida útil de la instal·lació de 20 anys, amb un 5% de taxa d'interès mitjà i una operació anual de 300 dies l'any. **[1]**

D'altra banda, si se separa la inversió global a les tecnologies d'evaporació en funció dels seus elements, el cost de l'evaporador suposa un 65% del total, essent la principal partida. Les bombes de circulació s'emporten un 5% de la inversió, el condensador de vapor que

prové de la planta de potència un 3%, el sistema de buit un 2%, i els sistemes auxiliars i de control el 25% restant.

b) Osmosi inversa i electrodiàlisi

Les millores tecnològiques que sorgeixen constantment, i la gran competència existent entre els fabricants de membranes ha contribuït a una rebaixa substancial dels costos d'inversió per aquest procés. De tota manera, segons la capacitat de la planta, és recomanable una inversió inicial més gran, **[54]** que a la llarga oferirà més beneficis, tant pel que fa al major rendiment dels equips de bombeig, com pels superiors percentatges de recuperació i rebuig a les membranes.

Capacitat de la planta dessaladora (m^3/dia)	*Cost d'inversió (€/m^3/dia)*
30000	810
60000	750
90000	670
120000	650
150000	630

Fig. 8.4. Cost d'inversió de l'osmosi inversa amb aigua del mar segons la capacitat de la planta dessaladora **[14]**

A la figura 8.4. hi ha una relació dels costos d'inversió d'una planta d'osmosi inversa, amb aigua del mar com a font d'alimentació, segons la capacitat de la instal·lació.

Si l'osmosi inversa té com a font d'alimentació aigües salobroses, el cost d'inversió es redueix significativament. Si la planta té una capacitat petita o mitjana, la inversió necessària serà un terç de la que cal en instal·lacions amb aigua del mar com a alimentació. Si la capacitat de la planta és gran, la inversió que es requereix és la meitat de la necessària per dessalar aigua marina.

Pel que fa a l'electrodiàlisi, els seus costos d'inversió són lleugerament superiors als de l'osmosi inversa amb aigües salobroses com a font d'alimentació. El cost de la seva amortització està xifrat en un interval entre 0,090 i 0,132 €/m^3.

8.1.4. Cost total d'inversió dels principals processos dessaladors

Recapitulant, a la figura 8.5. hi ha el cost total d'inversió mitjà que cal realitzar, per a cada tipus de procés de dessalació:

Procés de dessalació	*Cost d'instal·lació (€/m^3/dia)*
MSF	1200 - 1500
MED	800 - 1000
CV	950 - 1000
OI	700 - 900

Fig. 8.5. Cost d'instal·lació dels principals processos de dessalació **[3]**

Les dades que apareixen a la figura 8.5. són costos estimats comparatius mitjans, a nivell mundial. Com s'hi pot observar, l'osmosi inversa té un cost d'instal·lació significativament inferior al dels altres tres processos, tots ells basats en l'evaporació.

8.2. Costos d'explotació

Els costos d'explotació fan referència a aquells destinats al correcte funcionament de la planta, les seves operacions i el seu manteniment. Tot seguit, s'inclouen els principals components dels costos d'explotació d'una planta dessaladora.

8.2.1. Cost de l'energia

Aquest és un dels costos més importants per analitzar la viabilitat econòmica d'un procés dessalador. La determinació dels costos d'energia depèn dels consums o quantitat d'energia utilitzada en la producció de l'aigua dessalada, és a dir, el consum específic o unitari; i d'altra banda, del cost d'adquisició de la pròpia energia: les tarifes.

Per estimar el consum específic, a més d'incloure el propi consum del procés de dessalació, cal també tenir en compte els consums auxiliars, com ara els relacionats amb la fase de pre-tractament o serveis, a més de la captació d'aigua d'alimentació i a la impulsió de l'aigua producte. En total, el cost de l'energia pot suposar entre el 30 i el 60% del total del cost d'explotació de la instal·lació dessaladora.

El consum específic depèn directament de la capacitat de la planta dessaladora, de manera que com és gran és la seva capacitat, menor serà el consum específic que es produirà.

Tot seguit, a la figura 8.6., es pot veure l'interval del cost de l'energia per dessalar aigua actualment a l'Estat espanyol:

Consum específic	*Preu*	*Cost*
3 – 4,5 kWh/m^3	0,042 – 0,06 €/kWh	0,126 – 0,27 €/m^3

Fig. 8.6. Interval del cost energètic per a dessalació a l'Estat espanyol **[3]**

El consum de l'energia en la dessalació està disminuint ràpidament. D'aquesta manera, es consolida el futur d'aquests processos. Una de les raons d'aquesta baixada és la millor eficiència dels sistemes recuperadors d'energia, dels quals se n'ha parlat a l'apartat 6.2.2. A la figura 8.7., hi ha una relació dels nous recuperadors energètics, més eficients, que provoquen un menor consum.

Sistema de recuperació d'energia	*Consum específic (kWh/m^3)*
Turbines Pelton (sistema actual)	3,04
Cambres isobàriques ERI	2,61
Cambres isobàriques DESALCO	2,60

Fig. 8.7. Consum específic dels nous sistemes de recuperació d'energia **[3]**

Com es pot veure a la figura 8.7., les cambres isobàriques guanyen terreny a les turbines Pelton, més convencionals. Al consum en procés caldria afegir-hi el consum relacionat amb

la captació i pre-tractament de l'aigua d'alimentació, com s'ha esmentat amb anterioritat. Aquest consum es pot estimar al voltant de 0,4 kWh/m^3.

De tota manera, encara que s'afegeixi aquest terme, les tecnologies de la dessalació han aconseguit baixar del llindar dels 3 kWh/m^3 el consum de l'OI amb aigua marina, fet que incideix decisivament en la competitivitat dels preus de l'aigua dessalada.

Els valors estimats a la figura 8.5. parteixen del consum específic propi de l'osmosi inversa amb aigua marina com a font d'alimentació. En plantes d'OI alimentades d'aigües salobroses, el consum específic se situa entre 1 i 2 kWh/m^3. D'aquesta manera, el cost se situa entre 0,042 i 0,120 €/m^3. Si el procés en qüestió és l'electrodiàlisi, en una situació molt similar a la de les instal·lacions d'osmosi inversa amb aigües salobroses com a font d'alimentació, el cost serà entre 0,060 i 0,120 €/m^3. **[14]**

Pel que fa a les tecnologies d'evaporació, a la figura 8.8. es resumeix la magnitud dels costos dels principals processos d'aquest grup:

Tecnologia d'evaporació	*Consum específic (kWh/m^3)*	*Cost (€/m^3)*
MSF	3,5 - 4,0	0,126 – 0,144
MED - TCV	1,5 - 2,0	0,054 – 0,072
CV	9,0 - 11,0	0,433 – 0,529

Fig. 8.8. Cost de l'energia en els principals processos de dessalació per evaporació

8.2.2. Cost de productes i reparacions

Per a l'explotació de les plantes dessaladores, a més a més de l'energia, un altre aspecte fonamental és el conjunt de productes químics que intervenen al procés, els diferents filtres que hi participen i les diferents reposicions o recanvis que cal anar realitzant per assegurar un adequat manteniment d'aquestes instal·lacions:

<u>a) Productes químics i filtres</u>

Pot estimar-se de forma força precisa en funció dels consums específics de cada additiu químic que intervé al procés, que alhora depenen del disseny de la planta i del seu pre-

tractament. A la figura 8.9. hi ha una relació dels additius més emprats a les diferents fases del procés d'osmosi inversa:

Fase del procés d'OI	*Additiu*	*Funció*
Pre-tractament	Hipoclorit sòdic	Desinfecció
	Coagulants	Suport en la filtració
	Àcid sulfúric	Regulació del pH
	Polielectròlits	Floculació
	Dispersants	Control de precipitació
	Bisulfits	Eliminació del clor
Neteja de membranes	Diversos	Rentat químic
Post-tractament	Hidròxid càlcic	Control de pH i acidificació
	Anhídrid carbònic	Carbonatació
	Hipoclorit sòdic	Desinfecció

Fig. 8.9. Principals additius emprats en l'osmosi inversa amb aigua del mar **[14]**

Com es pot veure a la figura 8.9., són molts els reactius i additius que cal tenir en consideració en un procés de dessalació, com el d'osmosi inversa.

Una estimació general del cost dels additius químics emprats pot xifrar la despesa en un interval entre 0,018 i 0,054 €/m^3, per al procés d'osmosi inversa amb aigua del mar com a font d'alimentació. Si l'OI s'alimenta amb aigües salobroses, l'interval és una mica inferior, entre 0,012 i 0,030 €/m^3. I si el procés és l'electrodiàlisi, encara és més baix el cost dels additius i productes químics, entre 0,006 i 0,018 €/m^3. **[14]**

b) Reposició de membranes

Aquest element només serà present en el cas de plantes que s'hagin dotat d'aquest tipus de tecnologies. Les membranes acostumen a durar menys que la resta d'equips del sistema. A l'osmosi inversa, la taxa habitual de reposició és d'un 5 a un 8% anual, podent augmentar, segons la forma de captació de l'aigua marina, fins al 15%.

Aquest cost acostuma a ser molt variable, depenent de les freqüències de rentat i del control d'operació de la planta. Una estimació del cost de reposició de membranes fent servir osmosi inversa per dessalar aigua marina pot situar-se en un interval entre 0,012 i 0,036 €/m^3. Si l'osmosi inversa dessala aigües salobroses, aquest cost té un interval més petit, entre 0,012 i 0,024 €/m^3. I si el procés emprat és l'electrodiàlisi, el cost és encara inferior, entre 0,006 i 0,012 €/m^3. **[14]**

8.2.3. Altres costos

Hi ha altres costos associats a les plantes de dessalació. Aquests en són alguns dels elements:

a) Personal d'operació i manteniment

Els costos de personal tenien un pes considerable en la formació del cost total. Actualment, amb l'increment del grau d'automatització de les plantes, el pes de la mà d'obra d'operació s'ha anat reduint. Les plantes antigues empraven desenes de persones, mentre que ara una planta de capacitat mitjana s'explota amb 10 persones, mentre que les de capacitat gran utilitzen entre 20 i 30 persones. A més, en els últims anys s'ha anat estenent la contractació externa de serveis, com ara el manteniment, la vigilància o les comunicacions.

En una planta d'osmosi inversa dessalant aigua marina, el cost estimat per aquesta partida se situa entre 0,048 i 0,102 €/m^3. Si el procés d'OI dessala aigües salobroses, l'interval estarà entre 0,030 i 0,078 €/m^3, degut a què les plantes solen ser en aquest cas d'una capacitat més petita. I si el procés escollit és l'electrodiàlisi, l'interval serà molt semblant a l'anterior, entre 0,030 i 0,072 €/m^3. **[14]**

b) Subministraments i material de manteniment

Les despeses anuals de manteniment poden estimar-se entre un 1,5 i 2% del cost de construcció de la planta.

8.2.4. Cost total d'explotació dels principals processos de dessalació

Tenint en compte tots els aspectes que s'han anat detallant anteriorment, la figura 8.10. resumeix, anàlogament a la figura 8.5., en aquest cas els costos d'explotació o producció de l'aigua dessalada:

Procés de dessalació	*Cost de producció (€/m^3)*
MSF	1,10 – 1,25

MED	0,75 – 0,85
CV	0,87 – 0,95
OI	0,45 – 0,92

Fig. 8.10. Cost de producció de l'aigua dessalada dels principals processos de dessalació **[3]**

La figura 8.10. conté unes dades que també són comparatives a nivell mundial, agafant valors mitjans estimats. Com es pot veure, també en aquest cas l'osmosi inversa té els costos de producció més baixos, encara que la banda alta de l'interval té uns valors superiors al d'alguns processos evaporadors (CV i MED).

També s'hi pot comprovar l'alt cost de producció de l'evaporació multietapa (MSF), principalment a causa de la gran quantitat d'energia requerida, fet que augmenta sensiblement el preu final de l'aigua mitjançant aquest mètode.

La major part del cost total de la majoria de processos dessaladors prové de la despesa energètica. Aquest és el cas de l'osmosi inversa, tal i com es pot comprovar a la figura 8.11.:

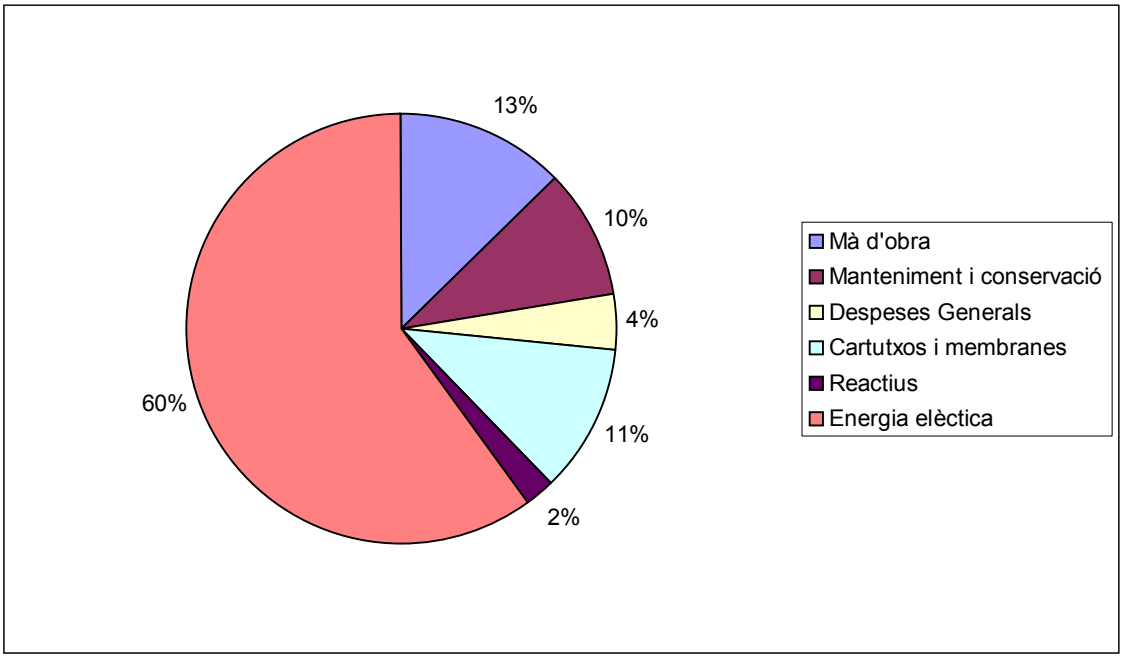


Fig. 8.11. Proporció de cada element en el cost total de l'osmosi inversa **[3]**

Com es pot observar a la figura 8.11., l'energia elèctrica requerida suposa el 60% del cost de producció total, i és la principal partida de les despeses produïdes en la dessalació per osmosi inversa.

És per aquest motiu que la viabilitat i competitivitat del preu de l'aigua dessalada mitjançant aquest mètode dependrà en bona part del cost energètic del procés, raó per la qual són tan importants els sistemes de recuperació de l'energia, com s'ha pogut comprovar numèricament a la figura 8.7.

Seguidament, es pot veure una comparativa amb els costos totals, en €/m^3, dels principals processos de dessalació, en la qual són inclosos també els costos d'inversió de cadascun d'ells. Es tracta de la figura 8.12., on es podrà veure, globalment, quin és el mètode dessalador més econòmic.

Com es pot veure a la figura 8.12., el mètode de dessalació amb un cost més baix és l'osmosi inversa. La segueixen l'evaporació multiefecte (MED) i l'evaporació multietapa (MSF), que com s'ha vist anteriorment, és el procés més car. Aquestes dades estan referides en tot moment a l'Estat espanyol.

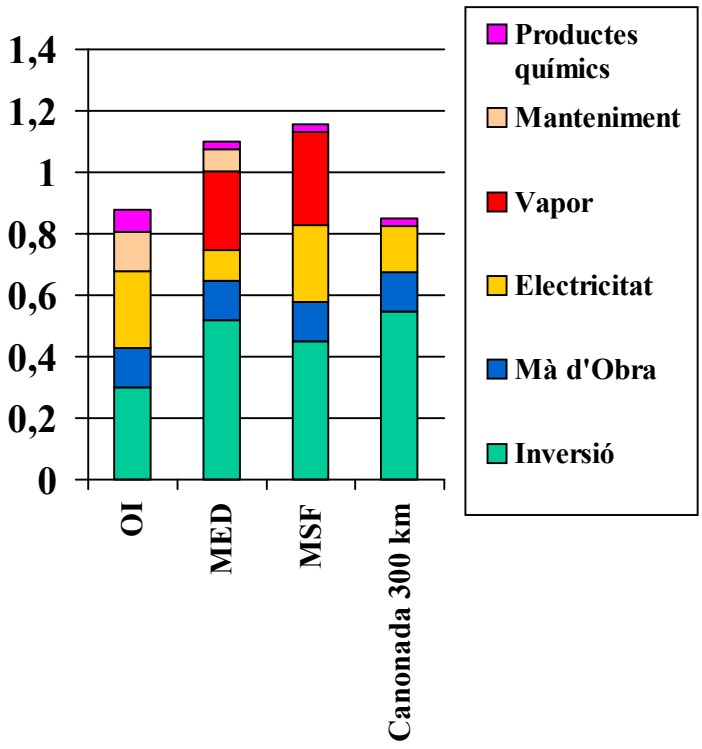


Fig. 8.12. Costos (en €/m^3) comparats dels principals processos de dessalació **[3]**

Al costat d'aquests tres processos, s'ha avaluat el cost de portar aigua a través d'una canonada d'una longitud de 300 km, fet que pot ser d'utilitat per esbrinar els costos de l'aigua dessalada en plantes que siguin construïdes a localitats situades lluny de la costa.

Aprofundint en aquesta circumstància, la figura 8.13. mostra el cost total de subministrament d'aquesta aigua a qualsevol punt de l'Estat:

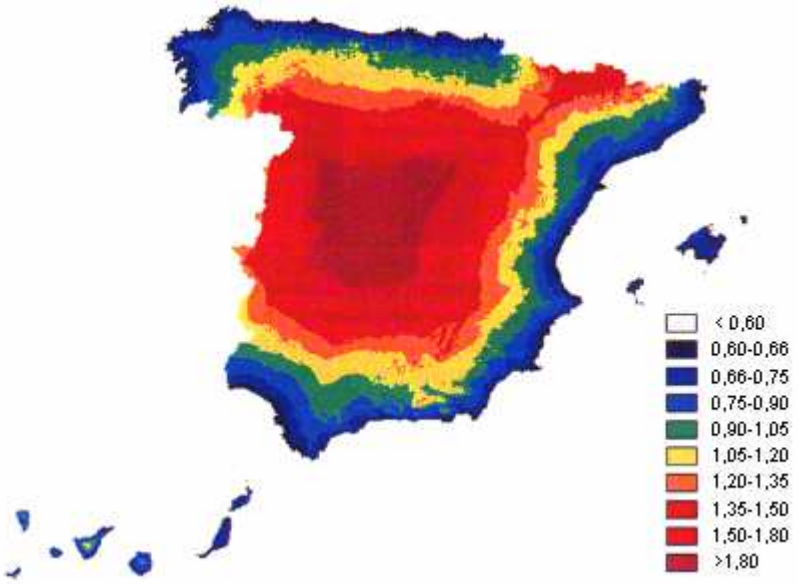


Fig. 8.13. Mapa de costos totals de subministrament (producció i transport) a l'Estat espanyol de 10000 m^3/dia d'aigua dessalada (en €/m^3) **[64]**

Com és lògic, el mapa d'Espanya que apareix a la figura 8.13. mostra un cost de subministrament més gran a mesura que s'avança més cap a l'interior de la Península.

8.3. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada

La rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada ve determinada, lògicament, pels costos associats a la seva producció, i té especial importància en camps com l'agricultura, en el qual el preu de l'aigua pot fer viable o no l'ús de la dessalació per aquest objectiu (veure apartat A.3.2. de l'Annex), així com en l'obtenció d'aigua potable per al consum domèstic humà.

8.3.1. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada per a l'agricultura

La rendibilitat de l'aigua per a l'agricultura depèn en gran mesura del tipus de cultiu. D'aquesta manera, a l'Estat espanyol, pot ser perfectament viable per a conreus amb agricultura intensiva. Aquest tipus d'agricultura es fonamenta en produir grans quantitats d'un producte determinat en espais reduïts. Amb aquesta tècnica, es pot obtenir una gran productivitat de la terra. Cal remarcar, però, que és l'únic país on es rega en una quantia significativa amb aigües dessalades.

Actualment, l'ús de l'aigua dessalada comença a tenir pes pel que fa al seu aprofitament per al rec respecte al consum humà. És a dir, el regadiu està assumint les possibilitats d'optar per fonts alternatives davant la dificultat per competir amb l'ús urbà en zones on el turisme i el rec competeixen fortament a la mateixa època de manca del recurs. Les superfícies regades amb aigües dessalades es concentren, en l'àmbit de l'Estat espanyol, a les illes Canàries i a Múrcia, a molta distància de la resta de comunitats autònomes.**[27]**

Cal destacar els beneficis de l'aigua dessalada per a la productiva agricultura mediterrània, d'una banda perquè l'ús d'aigua dessalada en l'abastament allibera recursos per al regadiu, i de l'altra perquè la barreja d'aigua dessalada amb aigües superficials o subterrànies (a més d'aprofitar aigües salinitzades que d'una altra manera serien inutilitzables) resulta a un cost mitjà assequible no només per a la producció de major rendibilitat, sinó també per produccions menys competitives, i a més perquè la seguretat del subministrament, independentment de la conjuntura meteorològica, és un factor molt important. **[22]**

Un exemple de rendibilitat en l'ús de l'aigua dessalada per a l'agricultura mediterrània es troba a la comunitat de regants de Mazarrón, **[52]** a Múrcia, on hi ha en funcionament una instal·lació dessaladora des del novembre de 1995, que aporta 4500 m^3/ha per regar 3600 ha d'agricultura intensiva d'enciam i tomàquet. A l'agost de 2005, la comunitat de regants d'aquesta horta murciana va decidir reduir més els seus costos d'operació. El cost d'inversió va suposar 4,72 milions d'euros, quantitat que va ser amortitzada en només dos anys, degut a l'elevat coeficient de conversió de la planta.

Un altre cas similar és el de la comunitat de regants de Cueva de la Almazora, a Palomares, Almeria, **[26]** on reguen les 5500 ha amb els 25000 m^3 que els subministra la planta dessaladora dels aqüífers de la zona, independentment de les aportacions de les precipitacions, i també de les sequeres que s'hi puguin produir.

Els pagaments per aigua dessalada se situen a l'agricultura l'any 2007 entorn als 0,30-0,35 €/m^3 i el seu cost al voltant de 0,60 €/m^3, fet que suposa un bon nivell de recuperació de costos, segons Joan Corominas, **[26]** director-gerent de l'Agència Andalusa de l'Aigua.

8.3.2. Rendibilitat econòmica de l'aigua dessalada potable

Uns 150 milions de persones beuen actualment aigua dessalada a tot el món. Pel que fa a l'Estat espanyol, ho fan dues terceres parts de la població canària i la meitat de la població de les illes Balears, i cada cop més el litoral peninsular mediterrani, on està previst que sigui emprada per uns cinc milions de persones al voltant de l'any 2009, quan s'espera que es posin en servei totes les plantes dessaladores del Programa AGUA, impulsat pel Ministeri de Medi Ambient (veure apartat 4.5). Aquesta expansió s'explica pels avenços tecnològics, que han reduït el consum d'energia que avui es necessita per dessalar un metre cúbic d'aigua del mar a una quarta part d'allò que es requeria fa 30 anys, i han abaratit a la meitat el cost del metre cúbic produït fa només 10 anys.

El consum d'aigua potable dessalada s'estén a l'Estat més enllà dels seus arxipèlags. D'aquesta manera, a la ciutat d'Alacant, el 40% de l'aigua potable en aquella ciutat prové de la dessaladora que hi ha instal·lada a la ciutat.

L'aigua dessalada és rendible perquè permet acabar amb la sobreexplotació hídrica que pateixen àmplies zones del litoral mediterrani. A més, davant la incertesa que planteja l'evolució futura de la demanda, el caràcter modular de la dessalació constitueix un mecanisme molt flexible per a l'ajustament de la demanda. **[22]**

Fa trenta anys, la dessalació d'aigua del mar era una tècnica poc viable des d'un punt de vista econòmic i tècnic. No obstant, la tecnologia actual per a la dessalació de l'aigua marina permet obtenir aigua potable en un marge de 0,50-0,65 €/m^3, amb una amortització de 25 anys com a màxim. Sumant els costos de pre-tractament i post-tractament, com ara la filtració, l'eliminació de la duresa, els additius, l'absorció, etc., aquests costos s'estimen de l'ordre d'1 €/m^3 (tal i com s'ha pogut comprovar a l'apartat 8.2.4.). A més, la tendència és a la baixada d'aquests preus degut al desenvolupament de la tecnologia de membrana que s'imposa al mercat.

Efectivament, els costos d'inversió s'han reduït considerablement. Això és degut, entre d'altres factors, a l'abaratiment del preu de les membranes, que a més de ser cada cop de més bona qualitat, valen la meitat que fa deu anys. La qualitat de les membranes, el període de vida útil i els costos de manteniment i reposició han millorat gràcies a les noves tècniques de fabricació i enrotllament automàtic de membranes, permetent a les empreses subministrar els seus productes a costos molt competitius.

Un altre dels factors que permet reduir costos és el consum d'energia (com s'ha vist a l'apartat 8.2.1.). En aquest sentit, la liberalització del mercat de l'energia elèctrica contribueix igualment a una rebaixa general en els preus des de l'any 1997. D'altra

banda, la dessalació pot ser un factor important en la demanda d'energia, però no el principal.

En aquest sentit, és significatiu el cas d'un país capdavanter en dessalació, com l'Aràbia Saudita. Allà, la dessalació per a aigua potable només representa el 9% del consum de l'energia primària del sector residencial, i un 1,8% del total de consum d'energia primària al país. A un altre Estat de l'Orient Mitjà, com Israel, si el 100% de les necessitats d'aigua potable del país fossin cobertes amb dessalació per osmosi inversa amb aigua marina, la demanda energètica només augmentaria un 8,5%.

Per als usuaris domèstics, no hi ha problemes importants per pagar els preus de l'aigua dessalada, especialment als països de l'OCDE (Organització per a la Cooperació i el Desenvolupament Econòmic), que són bàsicament els europeus, nord-americans i japonesos. No obstant, és un problema important per als usuaris de països en vies de desenvolupament, degut al baix rendiment de les xarxes de distribució d'aigua.

País membre de l'OCDE	*Augment de la factura mitjana de l'aigua*
Corea del Sud	+ 34%
Itàlia	+ 18%
Espanya	+ 14%
Estats Units	+ 12%
Austràlia	+ 9%
Regne Unit	+ 5%

Fig. 8.14. Augment en la factura mitjana de l'aigua provocat per la dessalació en varis països membres de l'OCDE **[3]**

La dessalació suposa el 25% de l'aigua subministrada en una ciutat costanera, i encareix el preu de l'aigua. A la figura 8.14. se'n pot veure el resultat, en termes de factura mitjana de l'aigua (incloent-hi l'aigua residual).

Com es pot comprovar, el fet de consumir aigua dessalada suposa un augment del preu de l'aigua, fet que té una incidència especial en països com Corea del Sud. A l'Estat espanyol, l'augment de preus és moderat, i pot veure's rebaixat en funció de la política d'ajuts i subvencions a la dessalació que eventualment puguin decidir les diferents administracions públiques.

9. Pressupost del projecte

En aquest capítol es fa una avaluació econòmica dels dos projectes exposats al capítol 7, tenint en compte tant el cost energètic de cadascun d'ells, com la despesa d'inversió i d'explotació de cada disseny de planta dessaladora, i finalment atenent a les especificitats pròpies de cada procés.

9.1. Pressupost associat al cas 1

El cas 1 (veure apartat 7.1.) fa referència al procés de dessalació consistent en una planta d'osmosi inversa en la qual s'hi introdueix un equip de cristal·lització per membranes. Per tant, cal tenir en compte el suplement d'energia que caldrà aplicar en aquest cas, a més de les bombes i els equips de microfiltració, nanofiltració i osmosi inversa presents al diagrama de flux, com es pot veure a la figura 7.2.

9.1.1. Cost de la inversió

En aquest apartat, es fa referència al cost, principalment, dels equips que participen al procés, i que són assenyalats amb una lletra cadascun d'ells a la figura 7.2.

Els càlculs complets realitzats es poden seguir a l'apartat G.1.1. de l'Annex. **[12]** i **[1]** En aquest apartat, hi ha el càlcul i el procediment realitzat per obtenir els costos dels equips més significatius. Els resultats es poden veure a la figura 9.1., amb les consideracions de cada element:

Equip	*Especificacions*	*Cost (k€)*
A. Bomba de baixa pressió	P = 271,7 kW	242
B. Equip de microfiltració	A = 5660 m^2	599
C. Bomba d'alta pressió	P = 512 kW	252
D. Equip de nanofiltració	A = 8534 m^2	6059
E. Bomba d'alta pressió	P = 4399 kW	951
F. Equip d'osmosi inversa	A = 24852 m^2	7398

G. Vàlvula	P = 48,5 kW	233
H. Vàlvula	P = 743 kW	335
I. Cristal·litzador per membrana	V = 1068,2 m^3	898
J. Intercanviador de calor	A = 37,7 m^2	107
K. Precipitador	Q = 8,28 kg/s	1869
Total d'inversió dels equips		**18943**

Fig. 9.1. Cost d'inversió en els equips de la planta dessaladora del cas 1 (en milers d'€)

A la figura 9.1. es pot veure el resultat dels càlculs realitzats per determinar el cost de cadascun dels elements que integren la instal·lació dessaladora dissenyada al cas 1. Les especificacions que hi apareixen fan referència a dades necessàries per poder assignar un cost determinat a l'aparell.

Així, per exemple, els equips de filtració i membranes són dimensionats a través de l'àrea de les seves membranes. En el cas de les bombes i les vàlvules, cal la potència que consumeixen aquests elements. Pel que fa al cristal·litzador per membrana, se n'han especificat els costos a través del coneixement del volum suposat de l'aparell. Per últim, la dada més rellevant per determinar els costos del precipitador ha estat el flux que hi ha arribat.

Seguidament, hi ha el càlcul realitzat per als equips amb els costos més significatius del procés. En concret, el cost dels equips que seguidament es troben indicats suposa el 90,67% del cost total d'inversió dels equips per a aquest procés. El procediment complet, amb les gràfiques necessàries per determinar alguns paràmetres, és a l'Annex G.1.1.

D. Equip de nanofiltració

El cost de l'equip de nanofiltració és superior al relatiu a la microfiltració, i també a l'ultrafiltració. Només és inferior a l'equip d'osmosi inversa. Per aconseguir obtenir els costos d'aquest equip, se segueix el mateix procediment que amb l'equip de microfiltració B. D'aquesta manera, se suposa una àrea de membrana de les diferents membranes de la nanofiltració, partint del flux que hi arriba (uns 1536 m^3/h, suposant densitat de l'aigua al corrent, és a dir, 0,4267 m^3/s). El flux per metre quadrat ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$) per a la nanofiltració amb finalitats de tractament d'aigua oscil·la entre 10 i 50. S'agafa un valor de

relació aproximada, degut al gran flux que circula per la planta, de 50 mL·s^{-1}·m^{-2}.**[12]** D'aquesta manera:

50 mL·s^{-1}·m^{-2} = $\frac{426700 mL/s}{A} \Leftrightarrow A = 8534 m^2$ (Eq. 9.1.)

Amb aquesta dada, es pot trobar el cost C_{BM} de l'equip de forma gràfica, fent ús de la recta que indica "dessalació de l'aigua del mar": → C_{BM} = 8600000 $ **[12]**

Es passa el cost de l'equip de microfiltració a euros, segons les dades del canvi del 17/10/2007:

Cost equip nanofiltració D (€)= $8600000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 6059325{,}02€$ (Eq. 9.2.)

E. Bomba d'alta pressió

Per trobar el cost de la bomba d'alta pressió, cal primerament obtenir la potència que aquesta consumeix. Suposant la densitat de l'aigua al corrent, en aquest cas:

P = Flux (m^3/s) · Diferència de Pressió (Pa) =

$= 1342 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot (69-10) bar \cdot \frac{10^5 Pa}{1bar} = 2199{,}4 kW$ (Eq. 9.3.)

Suposant una eficiència del 50%, la potència que li cal a la bomba és de 4398,8 kW.

Fent servir el gràfic de cost de les bombes, i tenint en compte els factors de material i pressió **[12]** (veure Annex G.1.1.), es troba que la despesa total és la següent:

$C_{BM} = C_P \cdot F^a_{BM}$ = 150000 $ · 9 = 1350000 $

Cost bomba E (€) = $1350000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 951173{,}11€$ (Eq. 9.4.)

F. Equip d'osmosi inversa

Es calcula el preu de les membranes d'osmosi inversa, a partir de la dada del seu cost mitjà: 500 € per unitat, a partir de la referència del cost que va suposar aquest element en el cas de la dessaladora de la Tordera. **[62]**

Es consideren 4 bastidors i 630 membranes per bastidor, agafant com a referència també les dades de la dessaladora de la Tordera. Per tant, el nombre total de membranes a l'equip d'OI serà de 5620. D'aquesta manera, el cost serà el següent: **[33]**

C inversió membranes equip OI = 5620 unitats · 500 €/unitat = 2810000 €

El cost d'inversió de les membranes és necessari per trobar altres costos indirectes, més endavant.

Per cercar el cost total d'inversió de l'equip, se suposa una àrea de membrana dels diferents filtres de l'OI, partint del flux que hi arriba (uns 1342 m^3/h, suposant densitat de l'aigua al corrent, és a dir, 0,3728 m^3/s). El flux per metre quadrat ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$) per a la l'osmosi inversa amb finalitats de dessalació d'aigua marina oscil·la entre 5 i 15 . S'agafa un valor de relació aproximada, degut a la gran quantitat de flux que circula per la planta, de 15 $mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$. **[12]** D'aquesta manera:

$$15\ mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} = \frac{372800 mL/s}{A} \Leftrightarrow A = 24852 m^2 \qquad \text{(Eq. 9.5.)}$$

Amb aquesta dada, es pot trobar el cost C_{BM} de l'equip de forma gràfica, fent ús de la recta que indica la dessalació del mar ("seawater desalination"): C_{BM} = 10500000 $ **[12]**

$$\text{Cost equip osmosi inversa F (€)} = 10500000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 7398013{,}11€ \qquad \text{(Eq. 9.6.)}$$

<u>I. Cristal·litzador per membrana</u>

El cristal·litzador per membrana és un aparell d'ús molt recent. De cara a avaluar els costos d'aquest element, es considera la funció d'aquest cristal·litzador, que realitza l'escalfament a 800 ºC de temperatura de les sals que provenen del precipitador. Per tant, es considera un forn de grandària industrial, per obtenir els costos, que s'equipararan als del cristal·litzador. Se suposa densitat de l'aigua al corrent.

El volum del cristal·litzador té relació amb el temps de residència de l'element, és a dir, quant de temps transcorre durant el procés d'obtenció de les sals. Suposant un temps de residència aproximat de 45 minuts, degut al gran flux que cal tractar, el volum de l'equip serà el següent:

V = 1095,6 m^3/h · (45/60) h = 821,7 m^3 és el volum suposat del cristal·litzador. (Eq. 9.7.)

Aquest volum es multiplica per un factor de seguretat, per tal que no estigui del tot ple en cap cas, i sempre hi hagi un espai sense omplir per evitar vessaments. Suposant un 30% més de volum del recipient:

V = 821,7 m^3 · 1,3 = 1068,2 m^3 és el volum amb el factor de seguretat inclòs. (Eq. 9.8.)

Amb aquesta dada, i temperatura T = 800 ºC, s'entra a la gràfica, tenint en compte el factor de material **[12]** (veure Annex G.1.1.):

$C_{BM} = C_P \cdot F_{BM}$ = 850000 $ · 1,5 = 1275000 $ **[12]** (Eq. 9.9.)

Cost cristal·litzador I (€) = $1275000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 898330{,}16€$ (Eq. 9.10.)

K. Precipitador

Cal tenir en compte que el material de construcció és l'acer inoxidable. Per cercar el cost d'aquest aparell, la següent figura indica el cost (C_p) en funció del flux de sòlids al precipitador. Com que el flux de sòlids que s'hi obté és de 29800 kg/h, és a dir, 8,28 kg/s per entrar al gràfic, on la línia vàlida és la que fa referència al decantador, l'aparell que es pot equiparar pel que fa les funcions que realitza en aquest cas amb el precipitador, és a dir, separar les sals sòlides del líquid. Mirant el gràfic, i tenint en compte el factor de material, s'obté el següent resultat (veure Annex G.1.1. per al procediment complet):

Per tant: $C_{BM} = C_P \cdot F_{BM}$ = 780000 $ · 3,4 = 2652000 $ **[12]** (Eq. 9.11.)

Cost precipitador K (€) = $2652000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 1868526{,}74€$ (Eq. 9.12.)

El capital fix (C_{FC}) d'aquesta planta dessaladora és de C_{FC} = 18943 k€.. El capital total (C_{TC}) de la instal·lació serà un 50% superior al capital fix, ja que s'hi afegiran en aquest cas els costos relacionats amb les contingències i honoraris, i també els de les facilitats auxiliars a la planta. En aquest cas, doncs, C_{TC} = 28414,5 k€.

9.1.2. Cost d'explotació

L'energia, com s'ha dit abans, és un dels principals costos d'explotació d'aquesta planta. Seguidament, a la figura 9.2., es pot veure la relació d'aquests costos, els càlculs dels quals estan detallats a l'apartat G.1.2. de l'Annex, encara que alguns dels principals es poden veure tot seguit:

COSTOS D'EXPLOTACIÓ	k€/any
COSTOS DIRECTES	
Captació de l'aigua del mar, (14% del capital fix)	2652
Edificació i urbanització (10% del capital fix)	1894
Tractament de residus (salmorra)	2
Mà d'obra	177
Supervisió i treball administratiu (15% de la mà d'obra)	27
Reactius químics	106
Serveis: Vapor per a l'intercanviador	1944
Electricitat (a 0,048 €/kWh)	1409
Manteniment i reposicions	195
Recanvi de membranes d'osmosi inversa	281
Total, A_{DME} =	**7898**
COSTOS INDIRECTES	
Despeses generals(nòmina i planta, empaquetatge i emmagatzematge, impostos locals i assegurança) (10% del capital fix), A_{IME} =	**1894**
Despeses de fabricació totals (excloent la depreciació), A_{ME} =	**9792**
DESPESES GENERALS	
Costos fixos anuals (factor d'amortització = 0,065), A_{GE} =	**1231**
Despesa total, A_{TE} =	11023
Ingressos de les vendes d'aigua (25536 m^3/dia a 0,685 €/m^3)	5746
Crèdits de subproductes (sals de magnesi)	9931

Benefici anual net, A_{NP} =	4654
Impostos sobre ingressos (50% del benefici anual net), A_{IT} =	(-2327)
Benefici anual net després d'impostos, A_{NNP} =	2327

Fig. 9.2. Cost d'explotació relacionat amb la planta dessaladora del cas 1(en milers d'€)

La figura 9.2. mostra tots els costos associats al funcionament de la planta dessaladora dissenyada a l'apartat 7.1. Aquests costos són dividits, segons el seu origen, en directes, indirectes i altres despeses generals, i cobreixen tots els aspectes de funcionament de la instal·lació. Seguidament, hi ha els ingressos relacionats amb l'aigua dessalada, així com els beneficis de la venda de l'òxid de magnesi, **[55]** que dóna rendibilitat al procés globalment gràcies a la quantia dels mateixos.

Alguns dels càlculs dels costos d'explotació més significatius es troben a continuació:

<u>Cost anual de l'energia elèctrica</u>

C elèctric = $c \cdot w \cdot f \cdot m \cdot 365$

on c és el valor del cost elèctric, fixat en c = 0,048 €/kWh, agafant un valor intermig de l'interval de la figura 8.6., w és el consum específic d'energia elèctrica (en aquest cas, s'estima que serà d'uns 3,5 kWh/m^3), i f = 0,9 és el factor de disponibilitat de la planta. Finalment, m és la capacitat de la planta, en m^3/dia, i segons els càlculs realitzats a l'apartat 7.1.4. i a l'apartat F.1. de l'Annex: m = 25536 m^3/dia.

Amb aquestes suposicions i previsions realitzades, es troba el valor del cost anual de l'energia elèctrica:

C elèctric = $c \cdot w \cdot f \cdot m \cdot 365$ = 0,048 €/kWh · 3,5 kWh/m^3 · 0,9 · 25536 m^3/dia · 365 =

= 1409280,77 € (Eq. 9.13.)

<u>Cost anual del vapor</u>

C vapor = $s \cdot G \cdot f \cdot 365$

on s és el cost del vapor d'escalfament, xifrat en s = 0,0019 $/lb, relativament baix degut a què no és un vapor a alta pressió, fet que fa disminuir el cost; G és el flux màssic de vapor, en kg/h, que hi haurà a l'intercanviador; i f = 0,9 és la disponibilitat de la planta.

Es canvien les unitats de s al SI i també a l'euro, tenint en compte el canvi de la divisa a data 17/10/2007:

$$s = 0{,}0019\frac{\$}{lb}\cdot\frac{1lb}{0{,}45359237kg}\cdot\frac{1€}{1{,}4193\$} = 0{,}00295€/kg \qquad \text{(Eq. 9.14.)}$$

La quantitat màssica de vapor (G) és de 49600 kg/h, considerant-la del mateix flux que la corresponent al corrent 18. El cost anual de vapor és el següent:

C vapor = s · G · f · 365 = 0,00295 €/kg · 49600 kg/h · 0,9 · 24 h/dia · 365 =

= 1154096,04 € (Eq. 9.15.)

<u>Cost de recanvi de membrana</u>

C membrana = r · CD membrana

on r és la taxa de recanvi de la membrana (r = 0,1 en aigües poc salinitzades); i CD és el cost en inversió de les membranes de l'equip d'OI del procés, i que segons s'ha calculat a l'apartat 9.1.1. i a l'Annex G.1.1., és de 2810000 €. Per tant, el cost de reposició de membranes és el següent:

C membrana = r · CD membrana = 0,1 · 2810000 € = 281000 € (Eq. 9.16.)

El cost anual és de 281000 €, que passat a €/m^3, és el següent:

$$\text{Cost } (€/m^3) = 281000\frac{€}{any}\cdot\frac{1any}{365dies}\cdot\frac{1dia}{25536m^3} = 0{,}0301\frac{€}{m^3} \qquad \text{(Eq. 9.17.)}$$

Com es pot comprovar, el preu està dins l'interval previst a l'apartat 8.2.2., que és, per al cas de l'OI amb aigua marina, entre 0,012 i 0,036 €/m^3.

<u>Benefici de la venda de sals</u>

B venda = t · S · f · 365

On t és el preu de venda de les sals formades en el cristal·litzador per membrana. En aquest cas, se suposa un alt rendiment en el procés de deshidratació del $Mg(OH)_2$ a MgO. El preu depèn molt del grau de puresa de cadascuna de les espècies. En aquest cas, se suposa un rendiment alt d'aquest procés d'obtenció de MgO de manera principal. Per tant, tot i no tenir un grau de puresa molt elevat, sí que les sals obtingudes seran majoritàriament l'òxid de magnesi. Es considera, doncs, un preu mitjà relativament baix, ja que amb un interval entre 20 i 500 $/tona segons aquesta puresa del MgO, **[55]** i **[41]** s'agafa el valor de 60 $/tona =

0,06 $/kg = 0,04227 €/kg (canvi de divisa a data 17/10/2007). El paràmetre S és el flux de sals que s'obtenen del procés. El corrent 13 és el que està format per aquestes sals, i el seu flux és de 29800 kg/h. Per últim, el paràmetre f = 0,9 és conegut, i indica la disponibilitat de la planta.

Per tant, el benefici que s'obté de la venda de sals és el següent

B venda sals magnesi = t · S · f · 365 = 0,04227 €/kg · 29800 kg/h · 0,9 · 24 h/dia · 365 =

= 9932073,56 € (Eq. 9.18.)

Benefici de la venda d'aigua dessalada

Per calcular el benefici que s'obté a partir de la venda de l'aigua producte, l'aigua dessalada, cal fixar un preu a l'aigua dessalada amb aquest procediment, tenint en compte que el procés ha de resultar econòmicament rendible tant per a la planta dessaladora com per als usuaris d'aquesta aigua. Es decideix el preu de 0,685 €/m^3, molt a prop del preu de 0,63 €/m^3 al qual es ven l'aigua dessalada a la planta de la Tordera, **[25]** la referència en el disseny del cas 1.

La producció diària és de 25536 m^3/dia. S'hi afegeix també el factor f = 0,9, que indica la disponibilitat de la planta. D'aquesta manera, els ingressos per les vendes seran els següents:

Ingressos vendes (€) = $25536\frac{m^3}{dia}\cdot\frac{365dies}{1any}\cdot\frac{0,685€}{1m^3}\cdot 0,9 = 5746174,56$ €/any (Eq. 9.19.)

Aquests, doncs, són els ingressos corresponents a l'aigua dessalada, tenint en compte un preu competitiu que pugui ser rendible econòmicament.

A l'apartat 9.1.3. s'hi fa l'anàlisi econòmica i les possibles raons dels valors dels costos i de la rendibilitat que se n'obtenen.

9.1.3. Avaluació econòmica

Com s'ha vist a la figura 9.2., després d'indicar els diferents costos relacionats amb la instal·lació dessaladora del cas 1, s'obté un benefici anual net després d'impostos de A_{NNP} = 2327 k€., un valor que serveix per calcular la taxa de retorn, juntament amb la depreciació (A_{BD}), que es calcula com el 10% del capital fix invertit (C_{FC} = 18943 k€). Per tant, A_{BD} = 1894 k€.

Amb aquestes dades, es calcula el valor de la taxa de retorn descomptats els impostos, a partir de la següent fórmula:

$$i = ([A_{NNP} + A_{BD}]/C_{TC}) \cdot 100 = ([2327 + 1894]/28414{,}5) \cdot 100 = 14{,}9\% \qquad \text{(Eq. 9.20.)}$$

Com es pot veure, la taxa de retorn és del 14,9%. És un valor baix, la qual cosa vol dir que el procés no és gaire rendible econòmicament per a la planta dessaladora. El que és habitual en aquests casos és que la taxa de retorn se situï al voltant del 25%.

En aquest procés, diverses causes han pogut motivar que hi hagi una taxa tan baixa, com ara el baix preu de venda de l'aigua dessalada (0,685 €/m^3), que ha de ser reduït per poder ser competitiu al mercat. Altres factors influeixen en aquesta situació, com ara l'alt cost del vapor per obtenir el subproducte (d'altra banda, molt necessari per a la rendibilitat del procés), les conduccions que s'han de dur a terme per poder captar l'aigua del mar, amb la despesa que això comporta, o bé l'edificació en terrenys propers a la costa, més cars que en altres indrets geogràfics.

De tota manera, els beneficis originats per la venda de les sals de magnesi donen una certa rendibilitat al procés a llarg termini. A la figura 9.3. es pot veure una gràfica sobre la rendibilitat econòmica del procés. Com es pot observar, el procés és rendible, i per tant, viable, ja que aproximadament als 7,61 anys d'haver invertit i haver posat en marxa la planta, es recupera la inversió realitzada, que queda completament amortitzada. El paràmetre TIR (Taxa Interna de Rendibilitat) reflexa aquesta circumstància, i precisament es troba en el moment en què el VAN (Valor Actual Net) és zero.

Aquesta amortització és notablement inferior a la d'altres plantes dessaladores, que poden tenir una amortització de fins a 15 anys. La raó d'aquest fet pot estar en els grans beneficis que té per a la instal·lació el fet d'obtenir un subproducte amb un preu rendible, i que pot compensar el baix preu de venda de l'aigua per a poder ser competitius al mercat.

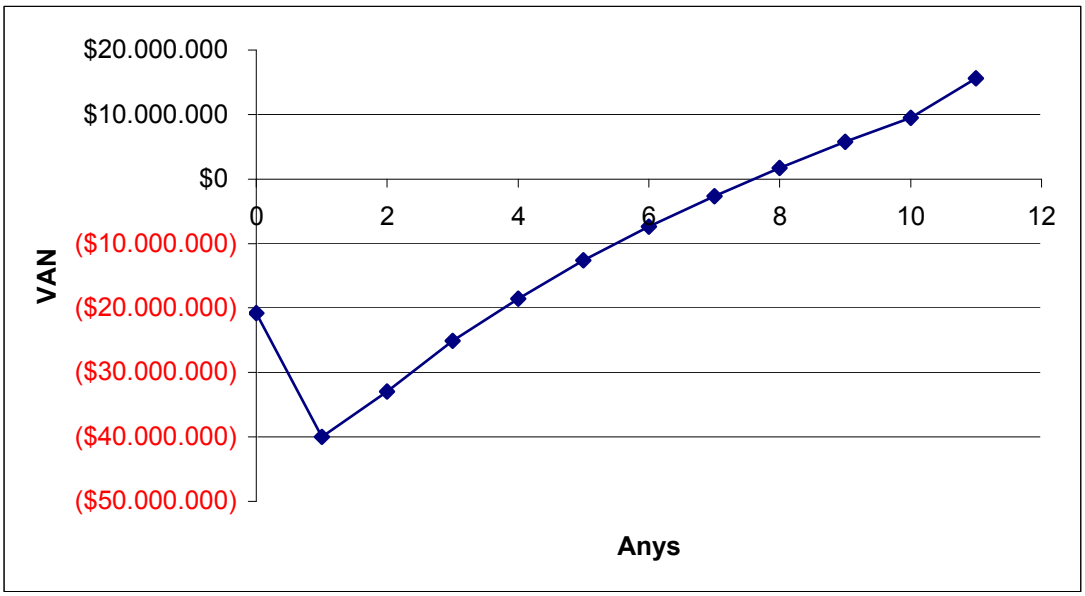


Fig. 9.3. Avaluació i rendibilitat econòmica de la planta dessaladora del cas 1

En referència al VAN, es pot veure que 11 anys després de posar en marxa la planta, el VAN serà exactament de 15641416 $, que tenint en compte el canvi de divisa a data 17/10/2007, dóna un VAN de 11020514 €, fet que demostra la rendibilitat del procés.

Per tant, encara que amb una planta dessaladora d'OI amb aigua marina, la taxa de retorn no suposa un valor gaire elevat (cal esperar fins a 7,61 anys per recuperar el valor de la inversió realitzada, molt gran per satisfer les necessitats d'una instal·lació d'una molt gran capacitat productiva), la vida operativa de la planta, que se suposa de 30 anys, més els beneficis anuals de la venda d'aigua dessalada i també del subproducte obtingut, acaben donant viabilitat econòmica a tot aquest procés.

9.2. Pressupost associat al cas 2

El cas 2 (veure apartat 7.2.) fa referència al procés de dessalació consistent en una planta d'osmosi inversa alimentada amb aigua salobrosa, en la qual es busca una optimització del pre-tractament per assolir una major qualitat de l'aigua, i un estalvi en la reposició de membranes, amb el consegüent benefici econòmic. D'altra banda, la presència d'una turbina recuperadora d'energia farà disminuir els costos com a conseqüència de l'electricitat.

La planta està pensada per a una producció que abasteixi una petita localitat. D'aquesta manera, els costos seran significativament menors que per al cas 1.

9.2.1. Cost de la inversió

En aquest apartat, es fa referència al cost, principalment, dels equips que participen al procés, i que són assenyalats amb una lletra cadascun d'ells a la figura 7.5.

Els càlculs realitzats es poden seguir a l'apartat G.2.1. de l'Annex. **[12]** i **[1]** En aquest apartat, hi ha els principals càlculs que s'han fet. Els seus resultats es poden veure a la figura 9.4., amb les consideracions de cada element:

Equip	*Especificacions*	*Cost (k€)*
A. Tanc d'emmagatzematge	L = 5,5 m ; D = 1 m	23
B. Bomba de baixa pressió	P = 3,1 kW	18
C. Equip de filtració de mescla	A = 24,5 m^2	16
D. Equip de filtració de control	A = 28,3 m^2	15

E. Bomba de baixa pressió	P = 2,9 kW	18
F. Equip d'ultrafiltració	A = 46,8 m^2	35
G. Bomba d'alta pressió	P = 21,7 kW	95
H. Equip d'osmosi inversa	A = 60,3 m^2	60
I. Tanc d'emmagatzematge	L = 6 m ; D = 1 m	37
J. Bomba de baixa pressió	P = 0,56 kW	2
K. Turbina recuperadora d'energia	P = 39,75 kW	86
Total d'inversió dels equips		**405**

Fig. 9.4. Cost d'inversió en els equips de la planta dessaladora del cas 2 (en milers d'€)

A la figura 9.4. es poden observar els costos de cadascun dels aparells que formen part de la planta de dessalació que s'ha dissenyat al cas 2. Les especificacions, igual que al cas anterior, són les dades que calen per poder determinar el cost de cada equip.

Així, per exemple, els equips de filtració i membranes són dimensionats a través de l'àrea de les seves membranes. En el cas de les bombes, cal la potència que consumeixen aquests elements. Per últim, per determinar els costos dels tancs d'emmagatzematge, cal dimensionar-los tant pel que fa a la seva longitud com el seu diàmetre.

A continuació, hi ha el càlcul realitzat per als equips amb els costos més significatius del procés. En concret, el cost dels equips que seguidament es poden veure suposa el 77,39% del cost total d'inversió dels equips per a aquest procés. El procediment complet es troba a l'Annex G.2.1., que inclou el suport gràfic que s'escau per cercar alguns valors.

<u>F. Equip d'ultrafiltració</u>

Els costos d'aquest equip són relativament baixos, inferiors als de l'OI i la NF, degut a la seva inferior qualitat de filtració, però superiors als de la microfiltració. Se suposa una àrea de membrana dels diferents filtres de la ultrafiltració, partint del flux que hi arriba (uns 26037,4 kg/h, que seran 25,28 m^3/h, suposant densitat del corrent 10 de 1030 kg/m^3, degut a la presència de residus i altres reactius químics).

El flux serà, doncs, de 0,00702 m^3/s. D'altra banda, el flux per metre quadrat ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$) per a la ultrafiltració amb finalitats de purificació d'aigua marina oscil·la entre 30 i 70. En el cas d'aigües salobroses, s'ha dimensionat l'equip d'osmosi inversa amb una relació de 120 $mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$. **[12]** Per tant, el valor d'aquesta relació per a l'equip d'ultrafiltració haurà de ser superior, degut a què aquest equip es troba a la fase de pre-tractament del procés, i per tant, la seva funció és preparar el corrent abans del seu tractament a l'equip d'OI. S'escull finalment una relació de 150 $mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$. D'aquesta manera:

$$150\ mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} = \frac{7021{,}95 mL/s}{A} \Leftrightarrow A = 46{,}8 m^2 \qquad \text{(Eq. 9.21.)}$$

Amb aquesta dada, es pot trobar el cost C_{BM} de l'equip de forma gràfica, fent ús de la recta que indica "food and pharmaceuticals", perllongant la seva corba, tenint en compte que aquesta serà una fase de pre-tractament del procés, però la qualitat final de l'aigua ha de ser elevada, degut al procés d'optimització del pre-tractament que s'està duent a terme en aquest cas 2. El cost aproximat és el següent: C_{BM} = 50000 $ **[12]**

$$\text{Cost equip ultrafiltració F (€)} = 50000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 35228{,}63€ \qquad \text{(Eq. 9.22.)}$$

G. Bomba d'alta pressió

Per trobar el cost de la bomba, caldrà primer de tot saber la potència que necessitarà per comprimir un corrent que li arriba determinat. Suposant la densitat de l'aigua al corrent, en aquest cas:

P = Flux (m^3/s) · Diferència de Pressió (Pa) =

$$= 26 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} \cdot (20-5) bar \cdot \frac{10^5\ Pa}{1bar} = 10{,}8 kW \qquad \text{(Eq. 9.23.)}$$

Suposant una eficiència del 50% d'aquesta bomba és d'alta pressió, la potència que li cal a la bomba és de 21,7 kW. Fent servir el gràfic de cost de les bombes, s'agafa com a suposició de cost una bomba centrífuga (veure Annex G.2.1.), i tenint en compte els factors de pressió i de material, s'obté el següent cost:

$$C_{BM} = C_P \cdot F^a_{BM} = 30000\ \$ \cdot 4{,}5 = 135000\ \$ \ \textbf{[12]} \qquad \text{(Eq. 9.24.)}$$

$$\text{Cost bomba G (€)} = 135000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 95117{,}31€ \qquad \text{(Eq. 9.25.)}$$

H. Equip d'osmosi inversa

Es calcula el preu de les membranes d'osmosi inversa, a partir de la dada del seu cost mitjà: 400 € per unitat, a partir de la referència del cost que s'ha calculat al cas 1, però tenint en compte el preu inferior quan les aigües que cal tractar són salobroses, com és el cas 2.

En aquest cas, però, la gran diferència de producció (25536 m^3/dia al cas 1 per només 482 m^3/dia al cas 2) fa que no hi puguin haver les mateixes membranes. Partint d'una relació proporcional entre les membranes que caldrà fer servir en aquests processos, es pot deduir que les membranes que caldran en aquest procés seran 106 en total, repartides en 2 bastidors de 53 membranes cadascun d'ells.

D'aquesta manera, el cost serà el següent:

C inversió membranes equip OI = 106 unitats · 400 €/unitat = 42400 € (Eq. 9.26.)

El cost d'inversió de les membranes és necessari per trobar altres costos indirectes, més endavant.

Per cercar el cost total d'inversió de l'equip, se suposa una àrea de membrana dels diferents filtres de l'OI, partint del flux que hi arriba (uns 26,04 m^3/h, suposant densitat de l'aigua al corrent, ja que en aquest cas l'aigua és prou neta com per realitzar aquesta consideració).

Per tant, el flux serà de 0,00723 m^3/s. El flux per metre quadrat ($mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$) per a la l'osmosi inversa amb finalitats de dessalació d'aigua salobrosa oscil·la entre 30 i 80, però en alguns casos pot augmentar, en concret en situacions de petit flux volumètric a través de l'equip d'OI, i poca concentració salina. Així doncs, se suposa un valor de relació aproximada de 120 $mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$, per sobre de l'interval marcat en principi, degut a què gran part de la filtració anterior ja s'ha realitzat al procés de pre-tractament, i que el contingut en sal d'aquestes aigües és relativament baix, tractant-se d'aigües salobroses. Per tant, el valor especificat és propi per a aquesta situació. D'aquesta manera:

$$120\ mL \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} = \frac{7233{,}3 mL/s}{A} \Leftrightarrow A = 60{,}3 m^2 \qquad \text{(Eq. 9.27.)}$$

Amb aquesta dada, es pot trobar el cost C_{BM} de l'equip de forma gràfica, fent ús de la recta que indica la dessalació d'aigües salobroses ("brackish water"): C_{BM} = 85000 $ **[12]**

$$\text{Cost equip osmosi inversa H (€)} = 85000\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 59888{,}68€ \qquad \text{(Eq. 9.28.)}$$

<u>I. Tanc d'emmagatzematge</u>

Per calcular els costos relacionats amb el tanc d'emmagatzematge, primerament cal dimensionar l'equip, tant la seva llargada com el seu diàmetre. Per fer-ho, es considera l'equip un bidó mesclador. D'aquesta manera, s'obté una longitud (L) de 0,5 a 8 metres, i un diàmetre (D) de 0,3 a 4 metres. Tenint en compte que arriben, aproximadament, 20 m^3/h al tanc, es trien unes dimensions mitjanes de l'equip. D'aquesta manera, els paràmetres de longitud i diàmetre del tanc són, respectivament: L = 6 m; D = 1 m.

Amb aquestes dades, el volum del tanc serà de 4,71 m^3, més que suficient en aquest cas, tenint en compte que el temps de residència en cap cas superarà una hora. Amb el gràfic corresponent (veure Annex G.2.1.) es troba el cost, suposant orientació vertical de l'equip, i tenint en consideració els factors de pressió i de material:

$C_{BM} = C_p \cdot F^a_{BM}$ = 8500 \$ · 6,1 = 51850 \$ (Eq. 9.29.)

Cost tanc I (€) = $51850\$ \cdot \frac{1€}{1{,}4193\$} = 36532{,}09€$ (Eq. 9.30.)

K. Turbina recuperadora d'energia

La turbina recuperadora d'energia passarà un determinat flux de salmorra cap a la bomba d'alta pressió, per així poder reaprofitar els recursos energètics. Cal cercar la potència que consumeix la turbina, que, suposant la densitat del corrent de 1140 kg/m^3, tenint en compte l'elevada concentració salina d'aquest corrent de salmorra (molta sal en un corrent amb poc volum), serà la següent:

P = Flux (m^3/s) · Diferència de Pressió (Pa)

Segons la figura 8.7., les turbines Pelton consumeixen 3,04 kWh/m^3. Tenint en compte que el flux que hi arriba és de 5963 kg/h, i partint d'una densitat del corrent aproximadament com la de la salmorra, és a dir, 1140 kg/m^3, la potència que caldrà serà la següent:

Potència = $3{,}04 \frac{kW \cdot h}{m^3} \cdot \frac{1m^3}{1140kg} \cdot \frac{5963kg}{1h} = 15{,}9kW$ (Eq. 9.31.)

Com que la recuperació d'energia o eficiència de les turbines Pelton és del 40%, aproximadament, la potència que consumeix la màquina serà la següent:

$$P_{consumida} = \frac{P_{útil}}{Eficiència} = \frac{15{,}9kW}{0{,}4} = 39{,}75kW$$ (Eq. 9.32.)

Fent servir el gràfic de cost de les màquines recuperadores d'energia, es pot fer una aproximació al preu de la turbina, agafant com a suposició de cost una turbina axial. Es perllonga la corba degut als baixos números d'aquesta petita planta:

$C_{BM} = C_P \cdot F_{BM}$ = 35000 $ · 3,5 = 122500 $ **[12]** (Eq. 9.33.)

Cost turbina K (€) = $122500\$ \cdot \frac{1€}{1,4193\$} = 86310,15€$ (Eq. 9.34.)

El capital fix (C_{FC}) d'aquesta planta dessaladora és de C_{FC} = 405 k€.. El capital total (C_{TC}) de la instal·lació serà un 50% superior al capital fix, ja que s'hi afegiran en aquest cas els costos relacionats amb les contingències i honoraris, i també els de les facilitats auxiliars a la planta. En aquest cas, doncs, C_{TC} = 607,5 k€.

A diferència del cas 1, en aquest segon cas, la instal·lació de dessalació té una capacitat molt més reduïda (no s'arriben als 500 m^3/dia d'aigua dessalada) i el seu objectiu és concret: abastar d'aigua una petita localitat amb escassetat de recursos hídrics, aprofitant les aigües salobroses i subterrànies que hi pot haver.

9.2.2. Cost d'explotació

Tot seguit, hi ha els costos d'explotació de la planta de dessalació corresponent al cas 2. La figura 9.5. mostra la relació d'aquests costos. Per conèixer el procediment seguit per obtenir cadascun dels costos, es pot veure l'apartat G.2.2. de l'Annex, malgrat que en aquest apartat hi figuren alguns dels més significatius.

COSTOS D'EXPLOTACIÓ	**€/any**
COSTOS DIRECTES	
Captació de l'aigua salobrosa	8714
Edificació i urbanització (5% del capital fix)	20227
Tractament de residus (salmorra)	327
Mà d'obra	3349
Supervisió i treball administratiu (15% de la mà d'obra)	502
Reactius químics	14367

Serveis: Electricitat (a 0,054 €/kWh)	7700
Manteniment i reposicions	5545
Recanvi de membranes d'osmosi inversa	4240
Total, A_{DME} =	**64971**
COSTOS INDIRECTES	
Despeses generals(nòmina i planta, empaquetatge i emmagatzematge, impostos locals i assegurança), A_{IME} =	**13467**
Despeses de fabricació totals (excloent la depreciació), A_{ME} =	**78438**
DESPESES GENERALS	
Costos fixos anuals, A_{GE} =	**13467**
Despesa total, A_{TE} =	91905
Ingressos de les vendes d'aigua (482,3 m^3/dia a 0,85 €/m^3)	134670
Benefici anual net, A_{NP} =	42765
Impostos sobre ingressos (50% del benefici anual net), A_{IT} =	(-21382,5)
Benefici anual net després d'impostos, A_{NNP} =	21382,5

Fig. 9.5. Cost d'explotació relacionat amb la planta dessaladora del cas 2 (en €)

La figura 9.5. mostra tots els costos associats al funcionament de la planta dessaladora dissenyada a l'apartat 7.2. En aquest cas, els costos apareixen en euros, i no en milers d'euros (com en el cas anterior), degut a la magnitud inferior d'aquests en el cas 2. La classificació d'aquests costos es realitza, segons el seu origen, en directes, indirectes i altres despeses generals, i cobreixen tots els aspectes de funcionament de la instal·lació.

La forma de calcular els costos d'explotació ha variat respecte del cas 1, degut principalment a la gran diferència de capacitat de producció que hi ha entre ambdues plantes, fet que influeix decisivament en alguns dels costos d'operació de la instal·lació. A la mateixa figura 9.5., seguidament, hi ha els ingressos relacionats amb l'aigua dessalada, amb un preu de

l'aigua força elevat, per aconseguir una bona rendibilitat econòmica del procés de dessalació.

A continuació, es pot veure el procediment seguit per obtenir alguns dels principals costos d'explotació:

Cost de captació de l'aigua salobrosa

En el cas de la captació de l'aigua, el cost disminueix radicalment. Dependrà, en tot cas, de la profunditat de l'aqüífer del qual se n'extregui l'aigua. Al punt 8.1.2., s'indica que a la dessalació per aigües salobroses, el cost de la conducció i el bombeig d'aigua s'estableix entorn dels 0,042 i 0,120 €/m^3. S'agafa, doncs, un valor mitjà de l'interval, els 0,055 €/m^3. D'aquesta manera:

C captació aigua = 0,055 €/m^3 · 482,3 m^3/dia · 0,9 · 365 dies/any = 8713,95 € (Eq. 9.35.)

Cost anual dels reactius químics

C químics = k · f · m · 365

on k és el cost específic dels reactius químics, valorat en k = 0,021 \$/m^3 = 0,014796 €/m^3 (canvi de divisa a data 17/10/2007). S'agafa un valor mitjà del cost dedicat als productes i additius químics que s'assenyala al punt 8.2.2. per a l'OI amb aigua salobrosa, que és entre 0,012 i 0,030 €/m^3 ja que en aquest cas els reactius intervenen força al procés:

C químics = k·f·m·365 = 0,014796 €/m^3·0,9·482,3 m^3/dia·365 = 2344,21 € (Eq. 9.36.)

A més, es calculen per separat els costos d'adquisició de dos productes importants per al desenvolupament del procés. Primer és l'H_3PO_4 l'agent encarregat de controlar el pH i actua també com a inhibidor d'escala. Després, l'agent mineralitzador és la sílice (SiO_2). A l'apartat G.2.2. de l'Annex es pot veure el desenvolupament de les operacions. La suma dels reactius químics emprats habitualment, més aquests dos productes específics (sílice i àcid fosfòric), respectivament, per aquesta planta dóna aquest valor: 2344,21 € + 2995,92 € + 9026,63 € = 14366,76 €

Cost de recanvi de membrana

C membrana = r · CD membrana

on r és la taxa de recanvi de la membrana (r = 0,1 en aigües poc salinitzades); i CD és el cost en inversió de les membranes de l'equip d'OI del procés, i que segons s'ha calculat a l'apartat 9.2.1. i a l'apartat G.2.1. de l'Annex, és de 42400 €. Per tant, el cost de reposició de membranes és:

C membrana = r · CD membrana = 0,1 · 42400 € = 4240 € (Eq. 9.37.)

El cost anual és de 281000 €, que passat a €/m^3, és el següent:

Cost (€/m^3) = $4240\frac{€}{any}\cdot\frac{1any}{365dies}\cdot\frac{1dia}{482{,}3m^3}=0{,}024\frac{€}{m^3}$ (Eq. 9.38.)

Com es pot comprovar, el preu està al llindar, però dins, de l'interval previst a l'apartat 8.2.2., que és, per al cas de l'OI amb aigües salobroses, entre 0,012 i 0,024 €/m^3. D'aquesta manera, es dóna per bo el fet de tenir un equip d'optimització del pre-tractament, ja que els costos de les reposicions de membranes baixen significativament respecte el cas 1, tant comparativament com qualitativa.

Costos fixos anuals

Els costos fixos anuals, per a aquest cas 2, una planta d'osmosi inversa alimentada amb aigua salobrosa, no es calculen a través de la relació del factor d'amortització que s'ha emprat al cas 1, on la planta en qüestió era d'una capacitat molt superior, i amb aigua del mar com a font d'alimentació.

D'aquesta manera, s'estableix un cost amb un interval d'entre 0,168 i 0,360 €/m^3, on també hi són inclosos els costos indirectes, i que varia segons la dificultat d'extracció de l'aigua salobrosa o subterrània que cal dessalar. S'agafa un valor de 0,17 €/m^3, un valor petit d'aquest interval, degut a les petites dimensions de la instal·lació. Per tant:

Suma de costos fixos anuals i indirectes = 0,17 €/m^3 · 482,3 m^3/dia · 0,9 · 365 dies/any = 26934,04 €

D'aquest cost, se suposa que el cost corresponent a les despeses fixes anuals seran la meitat d'aquesta suma. Per tant, el total de costos fixos anuals calculats específicament per a aquesta petita planta dessaladora amb aigües salobroses és el següent:

C fixos anuals = 0,5 · 26934,04 € = 13467 € (Eq. 9.39.)

Aquesta partida s'inclou dins les despeses generals.

Costos d'inversió indirectes

Per al cas 2, els costos d'inversió indirectes s'obtenen a partir de la relació anterior dels costos fixos anuals. Com s'ha fet abans, doncs, s'estableix un cost amb un interval d'entre 0,168 i 0,360 €/m^3, on també hi són inclosos els costos fixos anuals, i que varia segons la dificultat d'extracció de l'aigua salobrosa o subterrània que cal dessalar.

La suma dels costos en aquest cas dóna com a resultat una despesa de 26934, 04 €, dels quals s'ha considerat que la meitat dels quals corresponen als costos d'inversió indirectes (aquells que inclouen despeses generals com ara la nòmina i planta, l'empaquetatge i emmagatzematge, o bé els impostos locals i l'assegurança). En aquest cas, doncs, els costos d'inversió indirectes, calculats específicament per a aquesta petita planta dessaladora amb aigües salobroses, són aquests:

C indirectes = 0,5 · 26934,04 € = 13467 € (Eq. 9.40.)

Benefici de la venda d'aigua dessalada

Per calcular el benefici que s'obté a partir de la venda de l'aigua producte, l'aigua dessalada, cal fixar un preu a l'aigua dessalada amb aquest procediment, tenint en compte que el procés ha de resultar econòmicament rendible tant per a la planta dessaladora com per als usuaris d'aquesta aigua. Es decideix el preu de 0,85 €/m^3, un preu força més elevat que el corresponent al cas 1. De tota manera, el fet de tenir una capacitat productiva més baixa i un àmbit comercial molt més reduït provoca que el preu hagi d'augmentar per assegurar la rendibilitat del procés i la viabilitat de la planta de dessalació.

La producció diària és de 482,3 m^3/dia. S'hi afegeix també el factor f = 0,9, que indica la disponibilitat de la planta. D'aquesta manera, els ingressos per les vendes seran els següents:

Ingressos vendes (€) = $482{,}3\frac{m^3}{dia}\cdot\frac{365dies}{1any}\cdot\frac{0{,}85€}{1m^3}\cdot 0{,}9 = 134670{,}21$ €/any (Eq. 9.41.)

Aquests, doncs, són els ingressos corresponents a l'aigua dessalada, tenint en compte un preu competitiu que pugui ser rendible econòmicament. A l'apartat 9.2.3. s'hi fa l'anàlisi econòmica i les possibles raons dels valors dels costos i de la rendibilitat que se n'obtenen.

9.2.3. Avaluació econòmica

Com s'ha pogut veure a la figura 9.5., després d'indicar els diferents costos relacionats amb la instal·lació dessaladora del cas 2, s'aconsegueix un benefici anual net després d'impostos de A_{NNP} = 21 k€., un valor que serveix per calcular la taxa de retorn, juntament amb la depreciació (A_{BD}), que es calcula com el 10% del capital fix invertit (C_{FC} = 405 k€). Per tant, A_{BD} = 40,5 k€.

Amb aquestes dades, es calcula el valor de la taxa de retorn descomptats els impostos, a partir de la següent fórmula:

$$i = \left(\left[A_{NNP} + A_{BD}\right] / C_{TC}\right)\cdot 100 = \left(\left[21 + 40{,}5\right] / 607{,}5\right)\cdot 100 = 10{,}1\% \quad \text{(Eq. 9.42.)}$$

Com es pot veure, la taxa de retorn és del 10,1%. És un valor baix, encara més que en el cas 1, la qual cosa vol dir que el procés no és gaire rendible econòmicament per a aquesta instal·lació de reduïdes dimensions. El que és habitual en aquests casos és que la taxa de retorn se situï al voltant del 25%. La raó principal per a què hi hagi aquesta taxa de retorn tan baixa rau en la petita capacitat productiva de la planta, que amb prou feines suposa beneficis econòmics, davant la inversió que cal realitzar i els costos operatius de la instal·lació als quals cal fer front.

Comparant els costos d'inversió d'aquest cas 2 amb els del cas 1, és cert que s'observa un descens radical dels mateixos, principalment a causa de les menors dimensions dels equips per produir una quantitat molt petita, que no arriba als 500 m^3/dia. Malgrat això, la petita producció provoca uns ingressos molt reduïts, que impedeixen una superior taxa de retorn i una més gran rendibilitat del procés.

Comparat amb el cas 1, la planta presenta una complicació afegida: no genera cap subproducte (com sí que ho feia el cas 1 amb l'òxid de magnesi, sobre tot), fet que no dóna marge suficient com per augmentar els beneficis de la planta.

Degut a les dificultats econòmiques que presenta la instal·lació, ha calgut posar un preu de venda de l'aigua superior per, almenys, obtenir uns beneficis que puguin derivar en una rendibilitat, encara que escassa, del procés. El preu fixat, 0,85 €/m^3, és propi d'aquestes petites plantes, tot i ser relativament elevat. De fet, el preu en aquest segon cas hauria de ser inferior que al cas 1, si les plantes tinguessin capacitats similars, ja que els costos d'operació són inferiors quan es dessala aigua salobrosa que no pas quan l'aigua del mar és la que és dessalada, com es pot veure al llarg dels apartats 9.1. i 9.2. La raó que contradiu aquest principi és la gran diferència de capacitat d'ambdues plantes, que fa que el preu en aquest segon cas hagi de ser prou alt per assolir una certa rendibilitat del sistema. Malgrat això, el preu pot ser prou competitiu al mercat, sobre tot si es té en compte que els consumidors del producte, l'aigua dessalada, seran usuaris de la pròpia localitat, i per tant, el mercat és molt més reduït, fet que ajuda a la comercialització de l'aigua obtinguda.

A la figura 9.6. es pot veure una gràfica sobre la rendibilitat econòmica del procés. Com es pot observar, el procés és rendible, i per tant, viable, ja que aproximadament als 1,43 anys d'haver invertit i haver posat en marxa la planta, es recupera la inversió realitzada, que queda completament amortitzada. El paràmetre TIR (Taxa Interna de Rendibilitat) reflexa aquesta circumstància, i precisament es troba en el moment en què el VAN (Valor Actual Net) és zero. La vida operativa de la planta se suposa de 30 anys, com a mínim.

Tot seguit, la corba experimenta una pujada tot just després de dos anys d'operativitat de la planta, quan arriba a un VAN de 1133910 $, que tenint en compte el canvi de moneda a data

17/10/2007, suposa 798922 €. Aquest fet és causat per la rendibilitat a curt termini que experimenta el procés.

Tot i això, es pot veure com evoluciona la corba a la baixa a mesura que passen els anys, fins que arriba a un període d'estabilització, aproximadament 6 anys després d'haver posat en marxa la planta dessaladora. La raó d'aquest fet és que els costos d'explotació, després d'un curt període de rendibilitat a curt termini, superen uns beneficis reduïts.

Finalment, la corba s'estabilitza perquè s'aconsegueix un equilibri entre els beneficis produïts per la planta, d'una banda, i l'amortització dels costos d'inversió i els costos d'explotació, per una altra banda.

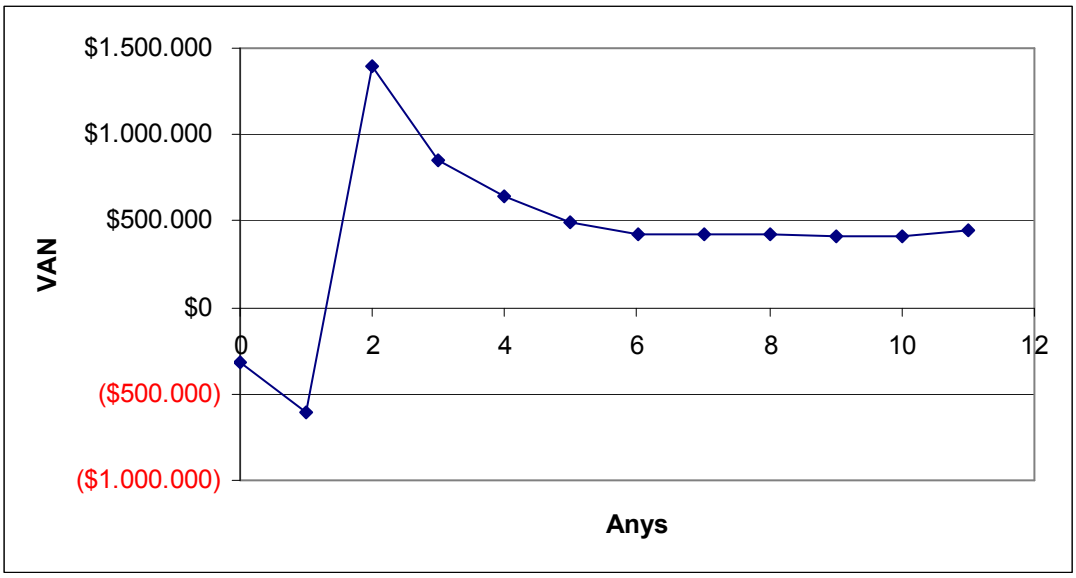


Fig. 9.6. Avaluació i rendibilitat econòmica de la planta dessaladora del cas 2

L'últim valor del VAN que es pot veure a la gràfica és el corresponent a 11 anys després de posar en marxa la planta, i que és exactament de 232640 $, que tenint en compte el canvi de divisa a data 17/10/2007, dóna un VAN de 163912 €, fet que indica que el procés serà rendible a llarg termini, però amb uns beneficis sempre petits.

D'aquesta manera, es pot concloure que la planta dessaladora d'OI amb aigua salobrosa dissenyada al cas 2, malgrat tenir una taxa de retorn prou baixa, i no disposar d'uns beneficis molt elevats, sí que pot resultar rendible econòmicament. La petita producció de la planta no té per què representar la inviabilitat del procés, i per tant, aquest tipus d'instal·lacions, pensades per abastar poblacions reduïdes i localitats específiques, poden resultar econòmicament rendibles, i per tant, viables.

Conclusions

El dèficit hídric del planeta va en augment a causa del procés d'escalfament global, causat per l'activitat humana. L'actuació de les institucions internacionals per pal·liar els seus efectes col·lisiona sovint amb els interessos econòmics de cada país, malgrat la creixent conscienciació de la societat sobre aquesta problemàtica. Apostar per energies renovables, optimitzar els actuals recursos i reduir les emissions de gasos contaminants són algunes de les mesures proposades per fer-hi front.

La dessalació de l'aigua del mar o salobrosa és una de les alternatives per obtenir aigua per a consum humà o per a ús agrícola, entre d'altres. És una opció aconsellable com a solució concreta i d'abast local, després d'haver analitzat totes les possibilitats de millora de la gestió dels recursos hídrics ja existents.

De les tècniques dessaladores que hi ha, les tecnologies de membrana són les més importants actualment, degut al seu menor consum energètic respecte les tecnologies d'evaporació, fet que porta com a conseqüència un abaratiment del preu de l'aigua dessalada, i per tant, dóna viabilitat al procés. L'osmosi inversa és el mètode més emprat.

La recerca en el camp de la dessalació se centra en la disminució de costos i en la minimització de l'impacte ambiental per l'abocament de salmorra, el corrent concentrat generat durant el procés. Un camí per reduir costos és aprofitar la instal·lació dessaladora per assolir altres fonts d'energia, com fan les plantes duals, amb l'obtenció d'aigua i electricitat; o bé aconseguir un subproducte la venda del qual augmenti la rendibilitat econòmica. D'altra banda, per disminuir l'impacte ambiental de la salmorra, se la pot fer servir per obtenir un altre producte. Aquests dos objectius convergeixen en el primer cas descrit al capítol 7 de la Memòria, on s'obtenen sals de magnesi a partir del corrent de rebuig, que contribueixen a economitzar el procés. També es pot aconseguir una major eficiència amb turbines de recuperació energètica, com en el segon cas descrit del mateix capítol, on l'optimització de la fase de pre-tractament de l'aigua ajuda a una durabilitat més gran de les membranes d'osmosi inversa, amb l'estalvi econòmic que suposa.

Dessalar aigua marina és més car que fer-ho amb aigua salobrosa, degut a què té més contingut salí, per bé que una major producció, normalment a partir de la primera, incideix decisivament en una superior rendibilitat econòmica del procés. D'aquesta manera, les plantes petites només són possibles en entorns molt localitzats, en contrast amb les grans dessaladores, que poden abastar grans entorns urbans, a més de tenir uns preus cada cop més competitius per guanyar terreny en l'ús domèstic i agrícola, entre d'altres.

Agraïments

En primer lloc, agrair al director del present Projecte Final de Carrera, José Luis Cortina, les seves indicacions i la seva guia realitzades al llarg del mateix.

En segon lloc, agraeixo a José María Gómez, enginyer tècnic, els seus suggeriments i el seu interès durant tot aquest temps.

A continuació, vull mostrar el meu agraïment als meus amics pel seu ajut, particularment al Samir, per posar els seus mitjans al meu servei, al Gabriel, per l'interès que ha mostrat en l'evolució del Projecte, i a la Marta, pels seus consells.

Per últim, vull donar les gràcies a la meva mare i el meu pare, pel suport, els ànims i la confiança que m'han anat transmetent al llarg d'aquests mesos, i per la paciència que han demostrat. A ells els hi dedico el present Projecte Final de Carrera.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

[1] AWWA, American Water Works Association. *Water desalting. Planning guide for Water Utilities.* John Wiley & Sons, Inc. Hoboken (New Jersey, EEUU), 2004, p. 43-119.

[2] HOWE, E.D., *Fundamentals of Water Desalination*, Vol. 1. Nova York (Estats Units), 1974. Enviromental Science and technology series, p. 17-327.

[3] IZAGIRRE ETXEBERRÍA, J.K. *Técnicas de desalación, costes de construcción y explotación.* Grup Agbar. Barcelona, 2004. [http://www.congreso.us.es/ciberico/archivos%20powerpoint/tortosajonkoldo.ppt, 20 de juny del 2007]

[4] MINISTERI DE MEDI AMBIENT. *Informe de sostenibilidad ambiental. Actuaciones urgentes del programa AGUA en las cuencas mediterráneas. Anexo IV.* Madrid, 2004, p. 6-18. [http://www.mma.es/secciones/agua/pdf/isa/anexo4.pdf, 15 de juny del 2007]

[5] MINISTERI DE MEDI AMBIENT. *Memoria ambiental comparativa entre las actuaciones urgentes en las cuencas del mediterráneo y la alternativa al proyecto de transferencias autorizadas por el artículo 13 de la Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional.* Madrid, 2004, p. 4-14. [http://www.chguadalquivir.es/chg/opencms/chg-web/menu_izquierda/marco-legal/plan_hidrologico_nacional/pdfs/informes_alternativa/MEMORIA_AMBIENTAL_COMPARATIVA_DGCYEA_18_06.pdf, 18 de juny del 2007]

[6] MINISTERI DE MEDI AMBIENT. *Perfil Ambiental de España 2006,* p. 3-9. [http://www.mma.es/secciones/calidad_contaminacion/indicadores_ambientales/perfil_ambiental_2006/pdf/perfilamb2006_agua.pdf, 22 de juny del 2007]

[7] ONU, Organització de Nacions Unides. *Cambio climático. Carpeta de información.* Bonn, 2004, p. 3-57. [http://unfccc.int/resource/docs/publications/infokit_2004_sp.pdf, 4 de juliol del 2007]

[8] POPKIN, R. *Desalination: Water for the world's future*. Nova York (Estats Units), 1968. Frederick A. Praeger Publishers, p. 3-103.

[9] RICO, A.M.; PAÑOS, V.; OLCINA, J.; BAÑOS, C. *Depuración, desalación y reutilización de aguas en España.* Ed. Oikos-Tau. Barcelona, 1998, p. 131-158.

[10] TORRES, M. *La desalación de agua de mar y el vertido de la salmuera.* Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente, ISSN 1577-9491, núm. 35, 2004, p. 27-33.[http://www.mma.es/publicacion/ambienta/julio_agosto2004_35/27_saladora_35.pdf, 10 de juliol del 2007]

[11] UCHE, J.; VALERO, A. *¿Hasta qué punto es alternativa la desalación?*. Universitat de Saragossa, 2002, p. 4-5. [http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigos/0196/$FILE/cp0196.pdf, 2 de juliol del 2007]

[12] ULRICH, G.D.; VASUDEVAN, P.T. *Chemical Enginnering. Process Design and Economics. A Practical Guide.* Segona edició. Process Publishing. Durham (New Hampshire, EEUU), p. 11-485.

[13] UNESCO. *Part II: A look at the World's Freshwater Resources.* p. 65-79. [http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/pdf/chap4.pdf, 6 de juliol del 2007]

[14] VALERO, A.; UCHE, J.; SIERRA, L. *La desalación como alternativa al PHN.* Saragossa, 2001, p. 15-69. [http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.pdf, 29 de juny del 2007]

[15] VEZA, J.M. *Introducción a la desalación de aguas.* Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria; Universitat de Las Palmas de Gran Canària, 2002, p. 34-289.

Bibliografia complementària

[16] ACA, Agència Catalana de l'Aigua. *Actuacions per a la millora de la garantia d'abastament i de la qualitat de l'aigua a l'àrea metropolitana de Barcelona*. Barcelona, 2005. [http://mediambient.gencat.net/aca/es/inici.jsp, 3 de setembre del 2007]

[17] ACA, Agència Catalana de l'Aigua. *Decret legislatiu 3/2003, de 4 de novembre.* [http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/directiva_marc/decret_3_2003.pdf 5 de setembre del 2007]

[18] ACA, Agència Catalana de l'Aigua. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Octubre de 2000.* [http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/directiva_marc/dma_2000_60_ce.pdf, 3 de setembre del 2007]

[19] ACA, Agència Catalana de l'Aigua. *Ley 62/2003.* [http://mediambient.gencat.net/aca/documents/ca/directiva_marc/lboe_62_2003.pdf, 3 de setembre del 2007]

[20] ALARCÓN, D.; BLANCO, J.; ZARZA, E.; MALATO, S.; LEÓN, L. *Comparación económica de procesos de desalación de agua del mar: El reto de la destilación multi-efecto con energía solar.* Tabernas (Almeria), 2002, p. 1-2. [http://www.psa.es/webeng/aquasol/files/Congresos/Alarcon%20-%20Congreso%20Iberico%20(04.11.2002).pdf, 20 de juliol del 2007]

[21] AYALA-CARCEDO, F.J. *Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000.* 2002, p. 6-15. [http://tierra.rediris.es/documentos/cambioclima.pdf, 10 de juliol del 2007]

[22] BALTANÁS, A. *Un componente estratégico.* El País, 23 de juliol del 2006. [http://www.almendron.com/tribuna/?p=10621, 2 de juliol del 2007]

[23] BARBERÍA, J.L. *El fin del modelo de presa y trasvase.* Madrid, El País 29 de juny del 2005.

[24] BASES DE DATOS DE LEGISLACIÓN. *Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.* [http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd140-2003.html, 5 de setembre del 2007]

[25] CATALUNYA CONSTRUYE. *La nueva cultura del agua.* Barcelona, 2005, p.7. [http://www.catalunyaconstruye.com/pdf/ObrasHidraulicas04.pdf, 26 de juliol del 2007]

[26] CICLO DE DEBATE: EL USO DEL AGUA EN LA ECONOMÍA ESPAÑOLA. *Análisis económico del uso del agua en la agricultura.* Sevilla, 2007, p. 2. [http://www.fundacion-biodiversidad.info/ciclodelagua/production/Resumen%20de%20las%20intervenciones%20-%20Sevilla%20-.pdf, 16 de juliol del 2007]

[27] CONAMA, Octavo Congreso Nacional de Medio Ambiente. *El 70% del riego de la agricultura se realiza por gravedad.* 2006, p. 1-3. [http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/pdfs_libro/CAP2_3.pdf, 14 de juliol del 2007]

[28] CONSUMER. *Alertan de que el Delta del Ebro podría desaparecer dentro de 200 años si no se frena su regresión.* 2004. [http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/2004/05/20/102906.php, 3 de juliol del 2007]

[29] DE LA CRUZ, C. *La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables.* Madrid, 2006, p. 43-50. [http://www.almendron.com/tribuna/?p=6370, 21 de juliol del 2007]

[30] EEA, European Environment Agency's. [http://www.eea.europa.eu/, 29 de juny del 2007]

[31] EEA, European Environment Agency's. *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Europa.* 2005, p. 1-4. [http://reports.eea.europa.eu/briefing_2005_3/es/Briefing_3_2005_ES.pdf , 29 de juny del 2007]

[32] ENGINEERING TOOL BOX. *Flow Units Converter.* [http://www.engineeringtoolbox.com/flow-units-converter-d_405.html, 3 d'octubre del 2007]

[33] ESTACION DESALADORA DE AGUA DE MAR. *Delta del Tordera (Girona)*, p. 1-2. [http://spa-aqualia.com/media/docs/Ficha%20Tordera.pdf, 5 d'octubre del 2007]

[34] FRENKEL, V. *Desalination Methods, Technology and Economics.* [http://www.idswater.com/Common/Paper/Paper_90/Desalination%20Methods,%20Technology,%20and%20Economics1.htm, 5 d'octubre del 2007]

[35] FVS, Fundació Vida Sostenible. *Efectos del cambio climático en el mundo y en España.* 2007. [http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=794, 18 de juliol del 2007]

[36] FVS, Fundació Vida Sostenible. *Implicaciones del Protocolo de Kioto para España.* 2005. [http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=156, 18 de juliol del 2007]

[37] FVS, Fundació Vida Sostenible. *La gran muralla mediterránea.* 2006. [http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=775, 19 de juliol del 2007]

[38] FVS, Fundació Vida Sostenible. *La lucha contra el cambio climático. El Protocolo de Kioto.* 2004. [http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=149, 18 de juliol del 2007]

[39] FVS, Fundació Vida Sostenible. *Países europeos que más han aumentado sus emisiones de CO_2.* 2005.

[http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=870, 19 de juliol del 2007]

[40] GUIJARRO, L. *Agua dulce, agua salada.* Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente, ISSN 1577-9491, núm. 11, 2002, p. 74-81. [http://www.mma.es/publicacion/ambienta/mayo2002_11/74_81_desaladoras.pdf, 12 de juliol del 2007]

[41] HIGH BEAM ENCYCLOPEDIA. *Magnesium hydroxide/oxide.* [http://www.encyclopedia.com/doc/1G1-99288751.html, 10 d'octubre del 2007]

[42] HISPAGUA, Sistema Español de Información sobre el Agua. *Monográficos Hispagua.Desalación.*[http://hispagua.cedex.es/documentacion/especiales/desalacion.php?localizacion=Desalaci%F3n, 26 de juny del 2007]

[43] IDA, International Desalination Association. [http://www.idadesal.org/, 22 de juny del 2007]

[44] INTERMON OXFAM. *El cambio climático.* [http://www.intermon.org/page.asp?id=2373, 9 de juliol del 2007]

[45] INTERMÓN OXFAM. *La disponibilidad y la distribución del agua.* [http://www.intermon.org/page.asp?id=2363, 9 de juliol del 2007]

[46] IPCC. International Panel on Climate Change. [http://www.ipcc.ch/, 7 de juliol del 2007]

[47] KUMAR KHANAL, S. *Membrane processes for Water and Wastewater Treatment.* Universitat de l'Estat d'Iowa (EEUU), p. 14.29. [http://te-webserver.cce.iastate.edu/courses/ce525/Membrane-Samir.ppt, 6 de setembre del 2007]

[48] LISBONA, P.; UCHE, J.; SERRA, L. *High temperature fuel-cells for fresh water production.* Universitat de Saragossa, 2005, p. 4-7. [http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TFX-4HGS940-1S-1&_cdi=5238&_user=10&_orig=search&_coverDate=11%2F01%2F2005&_sk=998179998&view=c&wchp=dGLbVzb-zSkWz&md5=c46deb3874ce3de4f90df0e7bf1ffcff&ie=/sdarticle.pdf, 4 d'octubre del 2007]

[49] MACEDONIO, F.; CURCIO, E.; DRIOLI, E. *Integrated membrane systems for seawater desalination: energetic and exergetic analysis, economic evaluation, experimental study.* Calàbria (Itàlia), 2006.

[http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6TFX-4MWRDDH-10-1&_cdi=5238&_user=10&_orig=search&_coverDate=02%2F05%2F2007&_sk=997969998&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzS&md5=a75eceb9d9bed585525a30a58606bf84&ie=/sdarticle.pdf, 4 d'octubre del 2007]

[50] MANANTIAL, EL, Revista. *La remineralización completa a coste competitivo.* Núm. 15. 2002, p. 1-2. [http://www.fcca.es/Docs/ManantialJulio2002.pdf, 8 d'octubre del 2007]

[51] MARCANO, J.M. *Educación ambiental. Recursos naturales. El agua.* [http://www.jmarcano.com/recursos/agua.html, 8 de setembre del 2007]

[52] MAZARRÓN. Dades de la dessaladora SWRO a Mazarrón (Múrcia). 2005, p. 2. [http://www.energyrecovery.com/pdf/mazarron.pdf, 10 d'octubre del 2007]

[53] NOVOPRESS. *Cambio climático: Expertos coinciden en que el Mediterráneo será una de las zonas más afectadas del mundo.* 2005, p. 1-2. [http://www.gva.es/ceam/press/press_PDF/Novopress_2005_02_14.pdf , 15 de juliol del 2007]

[54] OAS, Organization of American States. *Seawater/brackish water desalination by reverse osmosis in the British Virgin Islands.* [http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea59e/ch35.htm, 11 d'octubre del 2007]

[55] OBANDO, Y.; GORDILLO, R. Del V.; SALAZAR, J.J. *Producción de hidróxido de magnesio y óxido de magnesio a partir de salmueras marinas por el método de amoniación en un cristalizador continuo.* Anzoátegui (Veneçuela), p. 1-5. [http://dpi.eq.ufrj.br/ciaiq_22/CD/formCrCongreso/papers/01d/01d_819.pdf, 28 de setembre del 2007]

[56] ONU, Organització de Nacions Unides. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Nova York, 1992, p. 4-9. [http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf, 8 de juliol del 2007]

[57] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. *La crisis del agua amenaza a la salud y al desarrollo.* [http://www.paho.org/Spanish/DD/PIN/ahora12_mar04.htm, 12 de juliol del 2007]

[58] OSWALD, U. *Escasez del agua, cambio climático, calentamiento global, proyecciones en el mundo, América Latina y Argentina.* Universitat de Buenos Aires, 2006, p. 6-12. [http://www.afes-press.de/pdf/21_Oswald_Escasez_del_agua_cambio.pdf, 10 de juliol del 2007]

[59] PÉREZ, C.; AYUSO, G. *Agbar, ACS y Suez se adjudican la desaladora de El Prat por 158 millones.* Barcelona, El País 20 de juliol del 2006. [http://www.elpais.com/articulo/cataluna/Agbar/ACS/Suez/adjudican/desaladora/Prat/158/millones/elpepuespcat/20060720elpcat_11/Tes, 29 de juny del 2007]

[60] PONTES, M. *La composición del Agua del Mar.* [http://marenostrum.org/curiosidades/composicion/composicion.pdf, 22 de juny del 2007]

[61] REALES DECRETOS-LEYES. *Real Decreto-Ley 15/2005.* [http://www.todalaley.com/mostrarLey1698p1tn.htm, 4 de setembre del 2007]

[62] RSF, Red Sin Fronteras. *La tecnología que viene de fuera.* 2005. [http://www.redsinfronteras.org/modules/news/article.php?storyid=490, 11 d'octubre del 2007]

[63] SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F.J. *El ciclo hodrológico*. Universitat de Salamanca, 2004, p. 2-3. [http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T020.pdf , 30 de juny del 2007]

[64] SENENT, M.; MARTÍNEZ, D.; CORTEJOSA, J.M. *El futuro de la desalación de aguas en España.* Múrcia, 2004, p. 3-7. [http://www.portalagua.com/docs/anexospdf/anexoestudiofuturodesalacion.doc, 3 de setembre del 2007]

[65] SERRANO, A. *El uso del Agua en la Economía Española. Situación y perspectivas.* Madrid, 2007, p. 8-21 [http://www.slideshare.net/alexmaceira/antonio-serrano-uso-del-agua-en-la-economa-espaola/, 13 de juliol del 2007]

[66] SILLA, H. *Chemical Process Engineering - Design and economics*. Marcel Dekker Inc. Nova York, 2003.

[67] TORRES, M. *Desalación en España: avances técnicos y aspectos económicos.* Rabat (Marroc), 2006, p. 4-26. [http://www.matee.gov.ma/dne/documents/atelier%20dessalement/Exp%C3%A9rience%20d%E2%80%99Espagne%20en%20mati%C3%A8re%20de%20dessalement2.pdf, 21 de juliol del 2007]

[68] TORRES, M. *La desalación de agua del mar, ¿recurso hídrico alternativo?*, p. 1-16. [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/$File/PGA-c11.pdf, 23 de juliol del 2007]

[69] UCHE, J.; RALUY, G.; SERRA, L.; VALERO, A. *Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de desaladoras.* Universitat de Saragossa, 2005, p. 7-11. [http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/eb1c95a3b94e17dac1256c870057b081/0df06959f9a4ec8ac1256e9b00354403/$FILE/cp0272.pdf, 7 d'octubre del 2007]

[70] UICN, Unió Mundial per a la Natura. *Cambio climático y el agua en el Mediterráneo.* Màlaga, 2003, p. 1-4. [http://www.uicn.org/places/medoffice/Documentos/climate-change-mediakit_es.pdf, 19 de juliol del 2007]

[71] UNIVERSITAT DE NAVARRA, Campus tecnològic. *El agua en España.* [http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/06Recursos/110AguaEsp.htm30 de juliol del 2007]

[72] VILARÓ RIGOL, F. *El abastecimiento de agua a Barcelona y las comarcas de su entorno.* Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: La gestión del agua, núm. 51, Barcelona, 2000. [http://hispagua.cedex.es/documentacion/revistas/op/51/op51_10.htm#desalacion, 3 de juliol del 2007]

[73] YAMAMURA, H. *Desalination technologies for Water Treatment.* Toray Industries, Inc., 2005, p. 3-9. [http://marshlands.unep.or.jp/includes/file.asp?site=marshlands&file=2EEADA6B-4806-486C-925B-28C45F1BFF4C, 4 de setembre del 2007]