

# Dessalinització Nuclear

Estudi preliminar per  
l'aplicació a Catalunya



Universitat Autònoma  
de Barcelona

**Projecte Final de Carrera**

Autor: **Bernat Serra Pòrtulas**

Niu: **1216931**

Tutor: **Pere Masqué Barri**

Bellaterra, Juliol 2013

***Agraïments***

*Aquest projecte no haguera estat possible sense la col·laboració del director, Pere Masqué Barri, que en qualsevol moment de dubte s'ha mostrat molt obert a oferir-me ajuda i a orientar-me. Gràcies per la col·laboració constant.*

*També agrair el Pep Mas pel breu anàlisi i interès mostrat pel desenvolupament d'aquest projecte.*

**Resum**

*Aquest document pretén donar a conèixer el concepte de dessalinització nuclear, determinar els avantatges i inconvenients a nivell ambiental, així com els costos econòmics i energètics que poden suposar. Podem definir dessalinització nuclear com una planta de dessalinització d'aigua marina que és alimentada pel seu complet funcionament per un reactor nuclear. La planta utilitza tant l'energia elèctrica que es produeix com l'energia calorífica retinguda en l'aigua que surt del reactor. S'ha estructurat el treball en tres parts. La primera és una anàlisi de quin és l'ús que se'n fa a nivell mundial de la tecnologia de dessalinització. S'ofereixen dades de la producció mundial d'aigua dolça a partir d'aquesta tecnologia, en quins països se'n fa més ús i perquè. També es defineixen els tipus de plantes de dessalinització que es poden construir. El segon apartat és un anàlisi històric i d'actualitat de la dessalinització nuclear mundial. S'analitza el perquè del desenvolupament d'aquesta tecnologia i s'estudien les necessitats hídriques que es podran tenir en un futur. Es planteja si aquesta tecnologia pot satisfer-les. S'estudien les onze plantes de dessalinització nuclear que han funcionat. El tercer apartat és un estudi de la possible transformació de les dues plantes dessalinitzadores catalanes en dessalinitzadores nuclears. Es fa un anàlisi de costos energètics i de producció, sense tenir en compte els d'instal·lació. També s'investiga els possibles impactes per contaminació radiològica que podria generar l'aigua produïda amb aquesta tecnologia.*

**Abstract**

*This document aims to let know the nuclear desalination concept, determine the environmental advantages and disadvantages as well as the economic and energetic costs that it might produce. We can define nuclear desalination as a seawater desalination plant that works using nuclear energy for all its operation. The plant uses the electrical energy produced by the reactor and the heat of the water that gets out from it. The project is structured in three main parts. The first it is an analysis of which is the use of desalination technology in the world. It gives data of the world production, in which countries is more used and why. There are also defined the types of desalination plants that exist. The second section is an historical and actual analysis of the world nuclear desalination. It is studied why this technology has been developed and analysed the world water needs that might be in the future. It raises if this technology can satisfy them. It also studies the eleven desalination plants that had ever been in operation. The third part is a study of the possible transformation of the two catalan desalination plants. It is analysed the energy and production costs. It also investigated the radiological contamination that might cause the product water with this technology.*

# Índex

Agraïments

Resum

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Dessalinització</b> .....   | 5  |
| 1.1. Importància a nivell mundial.....  | 5  |
| 1.2. El golf d'Aràbia.....  | 6  |
| 1.3. Estructura i funcionament d'una dessalinitzadora.....                                    | 8  |
| 1.3.1. Tipus de plantes dessalinitzadores.....  | 8  |
| 1.3.2. Destil·lació .....   | 9  |
| 1.3.2.1. Multi Stage Flash Distillation.....  | 10 |
| 1.3.2.2. Multi Effect Distillation .....  | 10 |
| 1.3.3. Membrana.....  | 12 |
| 1.3.3.1. Osmosi Inversa .....   | 12 |
| <b>2. Dessalinització nuclear</b> .....   | 13 |
| 2.1. Història .....   | 13 |
| 2.2. Casos actuals de dessalinització nuclear .....   | 16 |
| 2.2.1. Kazakhstan.....  | 16 |
| 2.2.2. Japó.....  | 17 |
| 2.2.3. Índia .....  | 18 |
| 2.2.4. EEUU .....   | 18 |
| 2.3. Aplicacions Futures.....   | 18 |
| <b>3. Consideracions sobre Dessalinització Nuclear a Catalunya</b> .....                      | 20 |
| 3.1. Consum energètic i costos de producció de les plantes de dessalinització catalanes ..... | 20 |
| 3.1.1. Planta dessalinitzadora del Prat de Llobregat.....                                     | 20 |
| 3.1.2. Planta dessalinitzadora de la Tordera .....  | 21 |
| 3.2. Tecnologia nuclear com a solució a la demanda energètica .....                           | 22 |
| 3.2.1. Software DEEP 4.....   | 22 |
| 3.2.2. Mètode d'anàlisi .....   | 22 |
| 3.3. Impacte Ambiental .....  | 24 |
| 3.3.1. Triti .....  | 24 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.3.1.1.Com es produeix .....                              | 25        |
| 3.3.1.2.Prevenió de l'impacte .....                        | 25        |
| 3.3.1.3.Casos de triti en aigua producte.....              | 27        |
| <b>4. Conclusions i altres línies de treball.....</b>      | <b>28</b> |
| <b>Bibliografia.....</b>                                   | <b>30</b> |
| <b>ANNEX 1 - Informe Agència Catalana de l'Aigua .....</b> | <b>35</b> |
| <b>ANNEX 2 – Resultats complets DEEP 4.....</b>            | <b>37</b> |

## 1. Dessalinització

S'entén per dessalinitzar com el procés de llevar el caràcter salí de l'aigua o d'una substància<sup>1</sup>.

El món cada vegada té més limitacions pel què fa a disponibilitat d'aigua per l'agricultura, per la indústria i per l'ús domèstic. Degut al creixement demogràfic moltes regions estan experimentant un increment notable de la demanda d'aigua, que sovint supera les capacitats hídriques del territori. L'aigua potable és el recurs bàsic més important. Ha de ser protegida i conservada per satisfer les necessitats de les generacions futures<sup>2</sup>.

Davant d'aquesta situació, des de 1945<sup>3</sup> s'està apostant per utilitzar la tecnologia de dessalinització moderna per tal de produir aquest recurs. No és fins els anys setanta que s'explota àmpliament<sup>4</sup>.

### 1.1.Importància a nivell mundial

Entre els anys 1945 i 2004 s'havien construït més de 10.000 plantes de dessalinització amb una capacitat total instal·lada d'uns 35 hm<sup>3</sup> de producció diària<sup>3</sup>, aproximadament. *Waterworld*<sup>5</sup> ofereix dades de quines són les 100 plantes de dessalinització més importants del planeta ordenades per capacitat de producció diària. Segons aquestes dades, la majoria estan situades a l'Orient Mitjà en països com Aràbia Saudí, Kuwait, Unió dels Emirats Àrabs (UAE), Israel, etc. Aquest països tenen la característica comuna de ser països de clima àrid.

Ens trobem doncs, davant d'un important problema de disponibilitat d'aigua a alguns països que està essent resolta per la producció d'aigua a partir de dessalinització. Degut a la similitud de necessitats hídriques als països d'Orient Mitjà, s'ha considerat necessari fer un anàlisi de les condicions en què es troben alguns d'aquests països pel què fa a aquest aspecte.

## 1.2. El Golf d'Aràbia

Cal destacar aquest cas en particular perquè aproximadament el 65% de les plantes dessalinitzadores del planeta es troben en aquest golf. És el programa de dessalinització més important del món.

La disponibilitat d'aigua d'aquests països és bastant limitada. A la Taula 1.1 podem veure quina és la precipitació mitjana anual d'aquests països i la seva evapotranspiració. Veiem que són països càlids amb un dèficit hídric important<sup>6</sup>.

**Taula 1.1** Precipitació anual i fonts d'aigua renovable als països del Golf d'Aràbia

| País                 | Temperatura mitjana (°C) | Precipitació Anual (mm/any) | Evapotranspiració (mm/any) | Recursos renovables, 1000 Mm <sup>3</sup> |          |       |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|---|----------|-------|
|                      |                          |                             |                            | Superfície                                | Aqüífers | Total |
| Bahrain              | 25,5                     | 70                          | 1850                       |   | 0,9      | 0,9   |
| Kuwait               | 25,8                     | 75                          | 4180                       |   | 0,16     | 0,16  |
| Oman                 | 26,7                     | 134                         | 2482                       | 1,47                                      | 0,56     | 2,03  |
| Qatar                | 25                       | 75                          | 2701                       |   | 0,06     | 0,06  |
| Saudí                | 23,5                     | 105                         | 2993                       | 3,21                                      | 2,34     | 5,55  |
| United Arab Emirates | 27,5                     | 97                          | 3430                       | 0,37                                      | 0,1      | 0,47  |

Font: Al-Mutaz I.S., 2000

Per altra banda, el consum d'aigua ha augmentat considerablement els últims anys. La demanda és deguda al desenvolupament industrial i el creixement de l'agricultura, així com l'augment demogràfic i el consum per càpita<sup>7</sup>. La Taula 1.2 mostra l'aigua dolça disponible que té cada país del Golf d'Aràbia i com es preveu que evolucioni els propers anys<sup>7</sup>. Veiem que la tendència de la disponibilitat dels recursos hídrics és clarament decreixent.

**Taula 1.2.** Aigua dolça disponible per càpita i per any en els països del Golf d'Àràbia entre 1955 i 2050

| <i>País</i> | <i>Disponibilitat d'Aigua en m<sup>3</sup>/càpita·any</i> |             |             |             |             |             |             |             |
|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | <i>1955</i>   | <i>1990</i> | <i>2000</i> | <i>2003</i> | <i>2010</i> | <i>2015</i> | <i>2025</i> | <i>2050</i> |
| Bahrain     | 672   | 179         | 170         | 153         | 139         | 120         | 89          | N.D.        |
| Kuwait      | N.D.  | N.D.        | N.D.        | <100        | <100        | <100        | <100        | N..D        |
| Oman        | 4240  | 1017        | N.D.        | N.D.        | N.D.        | N.D.        | 359         | 250         |
| Qatar       | 1427  | 117         | <100        | <100        | <100        | <100        | 68          | N.D.        |
| Saudí       | 1266  | 306         | <500        | 400         | 320         | 250         | 113         | N.D.        |
| UAE         | 6195  | 308         | <500        | <400        | <300        | <200        | 176         | N.D.        |

*Font: Nimah M.N, Water Resources. Arab Environment: Future Challenges*

Les necessitats d'aquests països pel que fa al consum d'aigua són molt superiors de la que disposen. La Taula 1.3 mostra dades del consum que realitzen.

**Taula 1.3** Consum d'aigua en els Països del Golf d'Àràbia

| <i>País</i> | <i>Població<br/>(milions)</i> | <i>Utilització de l'aigua per sectors, %</i> |                   |                  |                           | <i>Consum per<br/>càpita, m<sup>3</sup>/any</i> |
|-------------|-------------------------------|--|-------------------|------------------|---------------------------|---|
|             |                               | <i>Total,</i>                                |                   |                  |                           |   |
|             |                               | <i>Agricultura</i>                           | <i>Industrial</i> | <i>Municipal</i> | <i>Mm<sup>3</sup>/any</i> |   |
| Bahrain     | 1,589                         | 59,09  | 4,55              | 36,36            | 220                       | 437,4   |
| Kuwait      | 2,039                         | 33,76  | 8,43              | 57,81            | 237                       | 116,2   |
| Oman        | 1,502                         | 93,19  | 1,13              | 5,68             | 1.234                     | 821,6   |
| Qatar       | 0,486                         | 48,39  | 6,45              | 45,16            | 155                       | 318,9   |
| Saudí       | 14,134                        | 86,3   | 2,19              | 11,51            | 7.330                     | 516,5   |
| UAE         | 1,589                         | 77,75  | 4,86              | 17,39            | 1.029                     | 647,6   |

*Font: Al-Mutaz I.S., 2000*

Comparant les Taules 1.2 i 1.3, veiem com, per exemple, en el cas de Bahrain, l'any 2000 tenia un consum per càpita d'aigua de 437,4 m<sup>3</sup>/any, però disposava com a país de 170 m<sup>3</sup>/any·càpita. Dóna un balanç hídric clarament negatiu.

Aquests països, per resoldre aquest dèficit hídric i suportar la demanda creixent d'aigua, han considerat necessari l'ús de tecnologia de dessalinització. La font d'energia de que més disposen per fer funcionar aquestes centrals és el petroli i el gas natural.



Havent vist com la tecnologia de dessalinització és necessària pel desenvolupament d'alguns països, per poder aprofundir encara més en la matèria, s'ha considerat oportú estudiar quins tipus de plantes existeixen, quin és el seu funcionament i estructura.

### 1.3. Estructura i funcionament d'una dessalinitzadora

Qualsevol procés de dessalinització necessita energia, tant calorífica com elèctrica. La calorífica, necessària per escalfar l'aigua de mar en els processos de destil·lació i per generar altes pressions en els d'osmosi inversa, pot ser extreta d'un cicle de vapor per combustió de fòssils, d'una central nuclear, d'una central tèrmica o qualsevol font adequada amb pèrdues de calor.

L'electricitat, necessària pels processos de destil·lació, pot ser extreta d'una central o de la xarxa elèctrica. Esquemàticament, a la Figura 1 podem veure les necessitats d'una planta dessalinitzadora, quins són les seves entrades i sortides<sup>8</sup>.

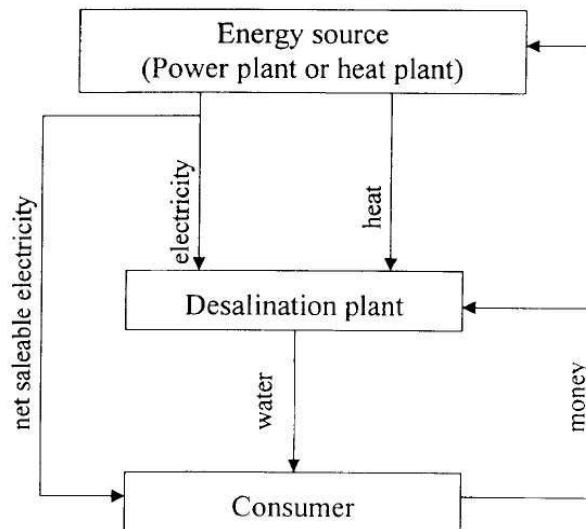


Fig. 1. Diagrama de fluxes d'energia, aigua i diners  
Font: International Atomic Energy Agency (IAEA) 2000

A partir d'una font d'energia tant elèctrica com calorífica es produeix aigua. L'energia elèctrica sobrant del procés també es ven al consumidor. Els beneficis econòmics obtinguts en aquest procés es reinverteixen en la producció d'energia per tancar el procés.

### 1.3.1. Tipus de dessalinitzadores

Podem distingir entre diferents tipus de processos per tal de dessalinitzar l'aigua de mar. Els més destacats es citen a la Taula 1.4:

**Taula 1.4.** Principals processos de dessalinització

| <i>Procés</i> | <i>Abreviació</i> | <i>Descripció</i>                              |
|---------------|-------------------|--|
| Destil·lació  | MED               | Multi-Effect Distillation                      |
|               | MSF               | Multi-Stage Flash                              |
| Membrana      | SA-RO             | Stand-Alone Reverse Osmosis                    |
|               | C-RO              | Contiguous Reverse Osmosis                     |
| Híbrid        | MED/RO            | Multi-Effect Distillation with Reverse Osmosis |
|               | MSF/RO            | Multi-Stage Flash with Reverse Osmosis         |

*Font: IAEA, 2000*

A continuació es descriuen els principals processos de destil·lació i membrana.

### 1.3.2. Destil·lació

En un procés de destil·lació, l'aigua del mar és escalfada per formar vapor pur i, posteriorment, es fa condensar. L'energia calorífica necessària per la destil·lació és subministrada per vapor a baixa pressió de saturació.

L'eficiència termodinàmica de les plantes de destil·lació està expressada en kg d'aigua produïda per kg de vapor usats.

$$GOR = \frac{kgH_2O_{prod}}{kgVapor} \quad (1)$$

Aquesta ràtio s'anomena *gain-output ratio* (GOR)<sup>8</sup>, la qual es troba entre 6 i 10 per les plantes destil·ladores del tipus MSF i arriba fins a 20 en les plantes MED. La ratio GOR, però, no explica la temperatura del vapor necessària per la destil·lació i per això no assigna un valor termodinàmic a aquest vapor.

Per tant, podem comparar diferents plantes de destil·lació utilitzant el criteri GOR. Aquest criteri només ens és útil si la diferència de temperatures entre el vapor com a font de calor i l'aigua del mar és la mateixa en les dues plantes<sup>9</sup>. Per exemple: una

planta amb un GOR de 8 que necessita vapor a 70 °C és termodinàmicament superior a una altra amb el mateix GOR<sup>8</sup> però que necessiti vapor a 120 °C.

### 1.3.2.1. Multi-stage flash (MSF)

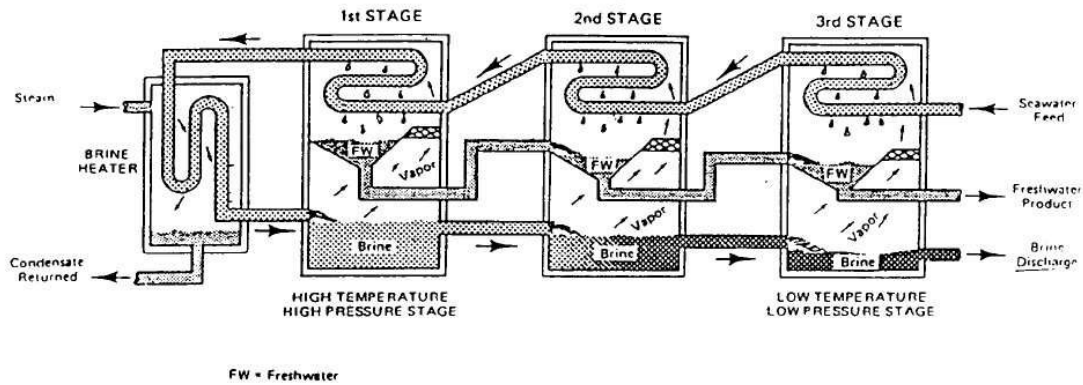


Fig. 2. Diagrama de fluxos d'una planta MSF

La Figura 2 és un esquema del diagrama de fluxos d'una planta MSF. L'aigua de mar entra a través dels tubs i passa per cada nivell o tanc d'evaporació (*stages*) on és progressivament escalfada.

Un evaporador MSF està dividit en diverses càmeres anomenades fases d'evaporació ultraràpida (*flash stages*) que, en general, són menys de 40. Aquestes cambres es mantenen a pressions reduïdes. Quan la salmorra escalfada entra en una càmera (fase d'evaporació ultraràpida) mantinguda per sota de la pressió de vapor de saturació de l'aigua, una fracció del seu contingut passa a vapor. El vapor passa a través de l'eliminador de boira i es condensa en la superfície exterior dels tubs de transferència de calor, donant el seu calor latent a l'aigua de mar entrant que passa dins dels tubs. La salmorra que no ha evaporat tot el seu contingut en aigua es mou a la següent etapa, i el procés es repeteix. Del condensat se'n recull l'aigua producte<sup>10</sup>.

### 1.3.2.2. Multi-Effect Distillation (MED)

El procés MED (Multi-effect Distillation) és el més antic. Des d'un punt de vista termodinàmic, els processos de MED són superiors als MSF ja que poden aconseguir un GOR més alt amb una àrea de transferència de calor idèntica i la mateixa diferència de temperatures entre la font de calor i l'aigua de refredament<sup>8</sup>.

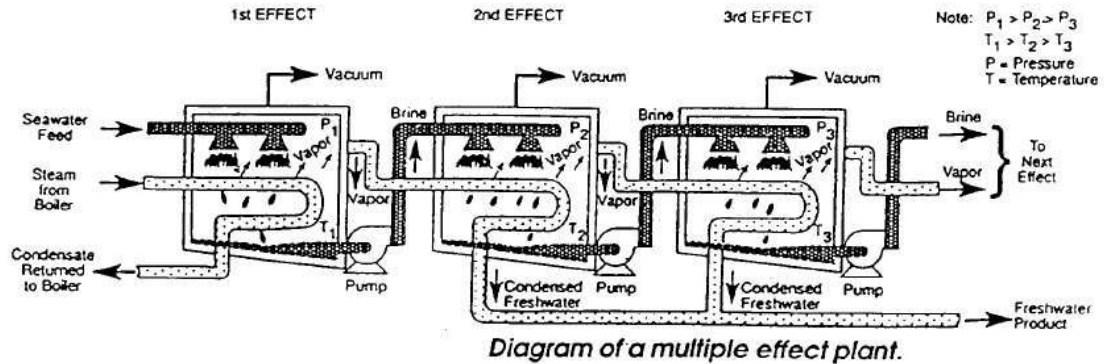


Fig. 3. Diagrama de fluxes d'una planta LT-HTME

La Figura 3 mostra el diagrama de fluxes d'un procés MED utilitzant tubs evaporadors horitzontals. A l'inici es fa passar vapor d'aigua per tuberïes per dins del primer tanc (Effect 1). Aquest escalfa l'aigua del mar que entra pel tub superior esquerra precipitant cap al fons. Part d'aquesta aigua salada s'evaporarà i part quedarà retinguda a la salmorra precipitada al fons del tanc<sup>10</sup>.

El nou vapor d'aigua format es farà circular cap el segon tanc (Effect 2). Per la seva banda, la salmorra també serà bombejada cap aquest tanc i es farà precipitar de nou per evaporar-ne la part aquosa que havia quedat retinguda. El vapor que ha entrat a aquest tanc condensa i desenvoca a la tuberïa d'aigua dolça. El vapor obtingut de l'evaporació de l'aigua de la salmorra es reutilitza pel següent tanc. El procés descrit en aquest paràgraf es repetiria diverses vegades entrant a tercers i quarts tancs. La pressió i temperatura del vapor va disminuint<sup>8,10</sup>.

Actualment, els processos MED amb la tècnica i el potencial econòmic més alt, són els processos de *Low Temperature Horizontal Tube Multi-Effect (LT-HTME)* i els processos de *Vertical Tube Evaporation (VTE)*. Les grans diferències entre les plantes LT-HTME i les VTE són: la disposició dels tubs d'evaporació, el lloc del tub on l'evaporació té lloc i els materials utilitzats. A les plantes LT-HTME, els tubs estan situats horitzontalment i l'evaporació es produeix espraïant la salmorra fora d'aquests tubs horitzontals creant una petita pel·licula on s'evapora. A les plantes VTE, l'evaporació té lloc dins de tubs verticals. La temperatura màxima de la salmorra en els processos LT-HTME és de 70°C<sup>8</sup>.

Les plantes MED tenen una eficiència major en el procés de transferència de calor d'evaporació que no pas les MSF.

**Taula 1.5** Dades tècniques de les plantes MED

| <b>Quantitat física</b>           | <b>Unitats</b>          | <b>LT-HTME</b> | <b>VTE</b> |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------|------------|
| Temperatura màxima de la salmorra | °C                      | 70             | 135        |
| GOR                               | 1                       | 4 - 13,5       | 4 - 21     |
| Número de Tancs                   | 1                       | 5 - 18         | 5 - 28     |
| Consum d'energia calorífica       | kW(th)·h/m <sup>3</sup> | 48 - 160       | 25 - 160   |
| Consum d'electricitat             | kW(e)·h/m <sup>3</sup>  | 1,2 - 3,5      | 0,9 - 4,5  |
| Consum total d'exergia            | kW·h/m <sup>3</sup>     | 9 - 14         | 9 - 14     |

*Font: IAEA 2000*

### **1.3.3. Membrana**

#### **1.3.3.1. Osmosi inversa (Reverse Osmosis, RO)**

El procés d'osmosi consisteix en posar dues solucions d'aigua amb diferent concentració de sal separades per una membrana semipermeable. Amb aquestes condicions l'aigua passa del recipient amb menys concentració salina cap el que més, per tal d'igualar les concentracions. L'osmosi inversa és un procés que consisteix en extreure forçadament l'aigua pura de l'aigua de mar, a través d'una membrana. Es realitza creant una gran diferència de pressions per tal que l'aigua es mogui a través de la membrana seguint un gradient de pressions. La compressió del fluid ha de ser més gran que la pressió osmòtica entre la solució salina i l'aigua pura. A la pràctica, l'aigua de mar ha de ser comprimida a 70 - 80 bars, ja que la seva pressió osmòtica és d'uns 60 bars<sup>8,10</sup>.

## 2. Dessalinització Nuclear

### 2.1. Història

Segons Kupitz<sup>11</sup>, el fet de combinar l'ús de la tecnologia nuclear amb l'obtenció d'aigua potable és una idea que va començar a sorgir els anys seixanta. Es veia amb un gran optimisme. En aquell moment es van fer alguns estudis de la viabilitat d'aquest procés en alguns països, indústries nuclears i empreses. L'IAEA en va fer alguns d'econòmics i tècnics entre els anys 1964 i 1967<sup>12</sup>.

En aquella època hi havia un interès considerable en promoure l'ús de l'energia nuclear per una àmplia varietat d'aplicacions a més de generar electricitat, així com submarins nuclears o calefacció per districtes<sup>12</sup>. Moltes de les propostes, quan van tenir un suport popular i polític, no es van quedar a nivell d'estudi sinó que es van realitzar alguns prototips i projectes de demostració. En el cas de la dessalinització nuclear, es va dissenyar i construir el complex de Shevchenko (ara Aktau a Kazakhstan) per la Unió Soviètica. El reactor BN-350 va entrar en funcionament el 1973 i des d'aleshores i fins el 1999 va generar calor i electricitat per a la producció d'aigua dolça.

El 1989, a la Conferència General de la IAEA, es va expressar un interès renovat envers aquesta aplicació. La Conferència va dictar una resolució en la qual es demanava que s'avalués la viabilitat tècnica i econòmica potencial de les dessalinitzadores nuclears. Aquest afer va quedar sota el títol de "*Plan for Producing Potable Water Economically*"<sup>11</sup>.

L'interès actual per tornar a parlar d'aquesta aplicació és degut a dues grans raons. La primera és la disponibilitat d'aigua per abastir la població mundial. Només el 2,5% de l'aigua del planeta és dolça. D'aquesta, 2/3 està retinguda en glaceres i gairebé 1/3 està retinguda en aqüífers de difícil accés. A la Taula 2.1 es mostren dades de distribució d'aigua segons el *World Business Council for Sustainable Development*<sup>13</sup>.

**Taula 2.1** Quantitats mundials d'aigua dolça

| <i>Origen</i>                                | <i>Volum (km<sup>3</sup>)</i> |
|--|-------------------------------|
| Aqüífers                                     | <10.000.000                   |
| Aigua de pluja                               | 119.000                       |
| Llacs naturals                               | 91.000                        |
| Infraestructures humanes de retenció d'aigua | 5.000                         |
| Rius   | 2.120                         |

*Font: World Business Council for Sustainable Development*

I segons *United Nations Environment Programme*<sup>14</sup>, l'aigua està distribuïda de la següent manera, per continents:

**Taula 2.2** Distribució de l'aigua dolça del planeta

| <i>Continent</i> | <i>Glaceres i capes de</i> |                     |                 |
|------------------|----------------------------|---------------------|-----------------|
|                  | <i>gel permanent</i>       | <i>Llacs i rius</i> | <i>Aqüífers</i> |
| Amèrica del Nord | 90.000                     | 27.003              | 4.300.000       |
| Amèrica del Sud  | 900                        | N.D.                | 3.000.000       |
| Groenlàndia      | 2.600.000                  | N.D.                | N.D.            |
| Europa           | 18.216                     | 2.529               | 1.600.000       |
| Àfrica           | 0,2                        | 31.776              | 5.500.000       |
| Àsia             | 60.984                     | 30.622              | 7.800.000       |
| Oceania          | 180                        | 221                 | 1.200.000       |
| Antàrtida        | 30.109.800                 | N.D.                | N.D.            |

*Font: Elaboració pròpia a partir de Nacions Unides*

Com podem observar a les Taula 2.1 i Taula 2.2, ens trobem amb una distribució desigual pels recursos d'aigua dolça.

Amb les dades que ofereix Nacions Unides<sup>15</sup>, els anys seixanta, quan es va plantejar aquesta possible aplicació, la població mundial era de 3.000 milions de persones aproximadament. La Taula 2.3 mostra dades de com ha anat evolucionant la demografia mundial i fa una previsió per l'any 2050.

**Taula 2.3** Població mundial, 1950, 1975, 2009 i 2050 segons diferents variants

| <i>Àrea</i>             | <i>Població (milions)</i> |             |             | <i>Població el 2050 (milions)</i> |                |             |                            |
|-------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|----------------|-------------|----------------------------|
|                         | <i>1950</i>               | <i>1975</i> | <i>2009</i> | <i>Baixa</i>                      | <i>Mitjana</i> | <i>Alta</i> | <i>Creixement Constant</i> |
| Món                     | 2529                      | 4061        | 6829        | 7959                              | 9150           | 10461       | 11030                      |
| Àfrica                  | 227                       | 419         | 1010        | 1748                              | 1998           | 2267        | 2999                       |
| Àsia                    | 1403                      | 2379        | 4121        | 4533                              | 5231           | 6003        | 6010                       |
| Europa                  | 547                       | 676         | 732         | 609                               | 691            | 782         | 657                        |
| Amèrica Llatina i Carib | 167                       | 323         | 582         | 626                               | 729            | 845         | 839                        |
| Amèrica del Nord        | 172                       | 242         | 348         | 397                               | 448            | 505         | 468                        |
| Oceania                 | 13                        | 21          | 35          | 45                                | 51             | 58          | 58                         |

*Font: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat (2009). World Population Prospects: The 2008 Revision. New York: United Nations*

Ens trobem en una situació en què les quantitats d'aigua dolça són aproximadament constants i que la població humana del planeta creix dia a dia. Per tant, és molt possible que gran part d'aquesta població no pugui tenir cobertes les seves necessitats d'aigua. A més, la major part de la població mundial es troba situada en zones costaneres<sup>16</sup>. Amb aquest escenari és trivial tenir en compte la tecnologia de dessalinització. El 97,5% de l'aigua és salada i per tant amplia molt la possibilitat de tenir aigua dolça a qualsevol punt del planeta.

La segona raó per la qual es torna a parlar de dessaladores nuclears és perquè la tecnologia en aquest àmbit ha millorat considerablement en els últims anys i és econòmicament viable. Es calcula que, depenent de les condicions econòmiques i financeres, la inversió feta en una tecnologia com aquesta s'amortitza en 10 o 12 anys<sup>11</sup>.



## 2.2. Casos actuals de dessalinització nuclear

Tal i com es pot observar a la Taula 2.4<sup>17</sup>, segons l'IAEA, a l'any 2010, hi havia les següents capacitats de producció d'aigua dolça per dessalinització nuclear arreu del planeta.

**Taula 2.4:** Capacitats de dessalinització nuclear mundial

| <i>Nom de la Planta</i> | <i>Localització</i>  | <i>Potència bruta [MW(e)]</i> | <i>Capacitat de producció [m<sup>3</sup>/dia]</i> | <i>Energia/ Dessalinització*</i> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|---|----------------------------------|
| Shevshenko**            | Aktau, Kazakhstan    | 150                           | 80000 - 145000                                    | LMFBR/<br>MSF&MED                |
| Ikata-1,2               | Ehime, Japan         | 566                           | 2000  | PWR/MSF                          |
| Ikata-3                 | Ehime, Japan         | 890                           | 2000  | PWR/RO                           |
| Ohi-1,2                 | Fukui, Japan         | 2 x 1175                      | 3900  | PWR/MSF                          |
| Ohi-3,4                 | Fukui, Japan         | 1 x 1180                      | 2600  | PWR/RO                           |
| Genkai-4                | Fukuoka, Japan       | 1180                          | 1000  | PWR/RO                           |
| Genkai-3,4              | Fukuoka, Japan       | 2 x 1180                      | 1000  | PWR/MED                          |
| Takahama-3,4            | Fukui, Japan         | 2 x 870                       | 1000  | PWR/RO                           |
| NDDP                    | Kalpakkam, India     | 170                           | 6300  | PHWR/<br>Hyb.MSF-RO              |
| LTE                     | Trombay, India       | 40 [MW(t)]                    | 30  | PHWR/LTE                         |
| Diablo Canyon           | San Luis Obispo, USA | 2 x 1100                      | 2180  | PWR/RO                           |

\*Els diferents models de reactprs nuclears i de dessalinització estan descrits a l'apartat 2.3.1

\*\*Shevshenko va ser tancada el 1999 després de 26 anys d'operació.

Font: IAEA 2010

### 2.2.1. Kazakhstan

#### Aktau: Shevshenko

El complex d'Aktau estava localitzat a una zona àrida a la península de Mangyshlak, a la costa est del Mar Caspi, des de 1973 fins el 1999. El complex estava construït a una àrea situada a 12 km de la ciutat, al costat d'algunes indústries.

Segons l'IAEA<sup>18</sup>, funcionava a partir d'un reactor ràpid de sodi refrigerat (*sodium-cooled fast reactor*) BN-350, que produïa electricitat i calor al complex de la central nuclear i planta de dessalinització. Estava annexionada amb una planta de combustibles fòssils. Junts produïen vapor per una turbina de condensació i tres turbines de contrapressió. El vapor s'utilitzava com a font de calor per el primer estadi d'evaporació d'una planta de dessalinització de tipus MED (definit a l'apartat 1.3.2.2 d'aquest treball). Si hi havia més vapor disponible del necessari per la dessalinització, aquest era utilitzat per suplir les necessitats energètiques de les indústries properes.

Hi havia dos tipus de destilat: aigua amb qualitat per ser ingerida, amb un total de sòlids totals disolts (TDS) de 200 mg/L i aigua d'alta puresa (TDS = entre 2 i 10 mg/L) per usos industrials. La qualitat de l'aigua producte era independent de la font d'energia.

### 2.2.2. Japó

L'any 2010 a Japó hi havia vuit<sup>19</sup> dessalinitzadores acoblades a centrals nuclears en funcionament. La Taula 2.5 extreta de IAEA<sup>17</sup>, mostra les característiques més destacades d'aquestes instal·lacions.

**Taula 2.5** Dades generals de les Plantes Dessalinitzadores del Japó

|                                     | <i>Ohi 1,2</i> | <i>Ohi 3,4</i> | <i>Takahama</i> | <i>Ikata 1,2</i> | <i>Ikata 3,4</i> |
|-------------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Procés                              | MED            | MSF            | MED/VS          | MSF              | MED              |
| No. Compartiments                   | 8              | 18             | 8               | 27               | 8                |
| Capacitat Total [m <sup>3</sup> /d] | 2600           | 1300           | 2000            | 2000             | 1000             |
| Gained Output Ratio                 | 6              | 6              | 6               | 8                | 6                |
| Salinitat de l'aigua [mg/L]         | 35.000         | 35.000         | 35.000          | 35.000           | 35.000           |
| Temperatura de la Salmorra [°C]     | 118            | 104            | 94              | 116              | 94               |
| TDS a l'aigua producte              | 10             | 10             | 5               | 5                | 5                |

Font: IAEA 2010

Després del l'accident a la central nuclear de Fukushima el març del 2011, el govern japonès va decidir tancar totes les plantes de producció d'energia nuclear. El 27 de març de 2012 només hi havia un reactor dels 54 en funcionament dels existents al país: Tomari – 3<sup>20</sup>. Aquest va ser tancat el 5 de maig de 2012. El 15 de juny del mateix any es va aprovar de reobrir les unitats 3 i 4 de la central nuclear d'Ohi, que va costar sis

setmanes perquè entressin en complet funcionament. El juliol de 2012 també es van obrir els reactors 3 i 4 de la central d'Ōi<sup>21,22</sup>.

Actualment s'està parlant de tornar a posar en marxa sis reactors més per finals de 2013<sup>23</sup>. Així doncs, de les set plantes de dessalinització nuclear de què disposaven l'any 2010, ara només n'hi ha una en funcionament: Ōhi – 3, 4.

### **2.2.3. India**

#### Kalpakkam: Nuclear Desalination Demonstration Plant (NDDP)

Es tracta d'una planta de dessalinització nuclear de tipus Híbrid MSF-RO que produeix 6.300 m<sup>3</sup>/dia d'aigua dolça. D'aquests, 4.500 són produïts per MSF i 1.800 per RO. La planta està acoblada a la central *Madras Atomic Power Station (MAPS)*<sup>17, 18</sup>.

La tecnologia híbrida d'aquesta planta té els seus avantatges. L'aigua produïda per MSF té una qualitat suficient per l'ús industrial, mentre que, si es vol obtenir una qualitat millor pel consum humà, la tecnologia RO garanteix aquest aspecte<sup>17</sup>.

La planta MSF va ser construïda el 2003 i la RO el 2008.

#### Trombay: Low Temperature Evaporation (LTE)

Amb el LTE s'utilitzen les pèrdues de calor del reactor nuclear CIRCUS per produir aigua dessalinitzada. Aquesta planta va ser construïda l'any 2004 i la seva capacitat de producció és de 30 m<sup>3</sup>/dia<sup>17</sup>. L'ús d'aquesta planta és de recerca.

### **2.2.4. Estats Units**

#### California: Diablo Canyon

Situada a Avila Beach, la central nuclear utilitza l'aigua del mar com a refrigerant i per la producció d'aigua potable. Utilitza un procés de RO. La planta va ser construïda el 1992 i té una capacitat de producció de 4.500 m<sup>3</sup>/dia produïts en dues unitats paral·leles<sup>17</sup>.

## **2.3. Aplicacions futures**

### Golf d'Àràbia

Com hem vist a l'apartat 1.2 d'aquest treball, els països del Golf d'Àràbia compten molt amb la tecnologia de dessalinització per al desenvolupament econòmic i el benestar social. Tenint en compte aquestes dades, s'ha considerat interessant analitzar si hi hauria motius perquè, en un futur proper, aquests països apostessin per la dessalinització nuclear.

Algunes fonts<sup>24</sup> esmenten que dins del propi mercat d'aquests països, el preu del barril de petroli és aproximadament d'uns 4,5 dòlars. Aquest petroli al mercat internacional estaria valorat per 125 dòlars/barril. És possible que aquest sigui un bon motiu per fer un canvi de consum energètic ja que internacionalment tenen un mercat assegurat. Així doncs, veient el petroli com una oportunitat de vendre a l'exterior i consumir-lo en menor mesura dins de les seves pròpies fronteres, no és sorprenent que aquest països busquin altres fonts de producció energètica.

### 3. Consideracions sobre Dessalinització Nuclear a Catalunya

En aquest apartat s'intenta analitzar quins serien els costos de producció d'aigua dolça a partir de les dues plantes dessalinitzadores existents a Catalunya, si les convertíssim en dessalinitzadores nuclears. A continuació es fa un anàlisi dels costos actuals i consum energètic que realitzen aquestes plantes.

#### 3.1. Consum energètic i costos de producció de les plantes Dessalinitzadores catalanes

##### 3.1.1. Planta Dessalinitzadora del Prat de Llobregat

S'han utilitzat les dades que ofereix Aigües Ter-Llobregat sobre la dessalinitzadora del Prat de Llobregat posada en funcionament l'any 2009<sup>25</sup>. Aquesta planta és d'Osmosi Inversa i obté l'energia pel seu funcionament de la xarxa elèctrica general.

S'ha elaborat dues taules a partir de les memòries de la de l'empresa pública que es presenten cada any, i es mostra quines quantitats d'aigua produeixen (Taula 3.1) i quin és el consum d'energia i els costos que presenta (Taula 3.2).

**Taula 3.1:** Producció d'aigua dolça de la Dessalinitzadora del Prat de Llobregat

|                             | <i>Producció</i>             |   |
|-----------------------------|------------------------------|---|
|                             | <i>Volum [m<sup>3</sup>]</i> | <i>Mitjana diària [m<sup>3</sup>/dia]</i> |
| Any 2011                    | 7.378.818                    | 20.216                                    |
| Any 2010                    | 10.780.443                   | 29.535                                    |
| Any 2009 (des del setembre) | 8.415.240                    | N.D                                       |

*Font: Elaboració pròpia a partir de ATLL–Declaració ambiental 2009, 2010 i 2011*

**Taula 3.2:** Consum energètic i costos econòmics de la Dessalinitzadora del Prat de Llobregat

|          | <i>Consum energia anual [kWh]</i> | <i>Cost subministrament energètic [€]</i> | <i>Cost específic [€/kWh]</i> | <i>Consum específic [kWh/m<sup>3</sup>]</i> | <i>Cost per volum d'aigua [€/m<sup>3</sup>]</i> |
|----------|-----------------------------------|---|-------------------------------|---|---|
| Any 2011 | 28.619.128                        | 2.540.969,08                              | 0,0888                        | 3,8786                                      | 0,3444  |
| Any 2010 | 39.579.984                        | 3.254.537,46                              | 0,0822                        | 3,6715                                      | 0,3019  |

*Font: Elaboració pròpia a partir de ATLL–Declaració ambiental 2009, 2010 i 2011*

Com que és una planta que porta molt poc temps en funcionament és difícil parlar d'un consum elèctric mitjà. Tot i així, podem veure que la magnitud del consum elèctric és de l'ordre de 3,5 GWh/any.

### 3.1.2. Planta Dessalinitzadora de la Tordera

Va ser posada en funcionament l'any 2002 i produïa anualment uns 10 hm<sup>3</sup> d'aigua<sup>26</sup>. Degut a la sequera viscuda a Catalunya entre els anys 2007 i 2008, l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) en va accelerar l'ampliació per produir 20 hm<sup>3</sup>/any. Segons les memòries, però, no s'ha arribat encara a aquesta capacitat de producció. També es tracta d'una planta d'Osmosi Inversa. Aquesta planta es va tancar a finals de 2011.

A la Taula 3.3 es mostra la producció d'aigua d'aquesta planta dessalinitzadora entre els anys 2007 i el 2011<sup>27</sup>. Les memòries de l'ACA no mostren les dades entre els anys 2002 i 2006.

**Taula 3.3** Producció d'aigua dolça de la Dessalinitzadora de la Tordera

| Any  | Producció anual         |                                      |
|------|-------------------------|--------------------------------------|
|      | Volum [m <sup>3</sup> ] | Mitjana diària [m <sup>3</sup> /dia] |
| 2011 | 7.778.259               | 21.310                               |
| 2010 | 7.128.149               | 19.529                               |
| 2009 | 6.384.361               | 17.491                               |
| 2008 | 10.096.953              | 27.3662                              |
| 2007 | 5.627.448               | 15.418                               |

*Font: Elaboració pròpia a partir de les memòries de l'ACA*

Pel què fa al consum energètic i els costos de producció d'aigua, les memòries de l'ACA no faciliten aquesta informació. Tot i així, segons un informe demanat expressament a aquesta agència (Annex 1), asseguren els següents resultats per l'any 2011.

**Taula 3.4:** Consum energètic i costos econòmics de la Dessalinitzadora de la Tordera

|          | <i>Consum<br/>energia<br/>anual [kWh]</i> | <i>Cost<br/>subministrament<br/>energètic [€]</i> | <i>Cost<br/>específic<br/>[€/kWh]</i> | <i>Consum<br/>específic<br/>[kWh/m<sup>3</sup>]</i> | <i>Cost per volum<br/>d'aigua [€/m<sup>3</sup>]</i> |
|----------|---|---|---------------------------------------|---|---|
| Any 2011 | 72.800.000                                | 5.521.645,11                                      | N.D.                                  | N.D.  | 0,61  |

Font: Elaboració pròpia a partir de ATLL–Declaració ambiental 2009, 2010 i 2011

## 3.2. Tecnologia Nuclear com a solució a la demanda energètica

### 3.2.1. Software DEEP 4

El *software Desalination Economic Evaluation Program (DEEP)*<sup>28</sup> és una eina pràctica i lliure creada per IAEA, que pot ser utilitzada per analitzar els costos potencials de la producció d'aigua d'una planta dessalinitzadora. Permet escollir a l'usuari una gran quantitat de paràmetres per tal de simular, de manera molt acurada, la planta que es vol estudiar.

### 3.2.2. Mètode d'anàlisi

Utilitzant aquest mètode d'anàlisi, en els següents subapartats es plantegen casos de possibles dessalinitzadores nuclears amb condicions similars a les de Catalunya. Cada un d'ells presenta uns resultats pel què fa al cost de l'aigua produïda. Així doncs, es parteix d'una planta dessalinitzadora d'Osmosi Inversa igual per a tots els casos.

Els paràmetres que es mantenen constants són:

- Capacitat de dessalinitzar de la planta: **20.000m<sup>3</sup>/dia**. Aquest valor és molt proper al de la dessalinitzadora del Prat de Llobregat i la Tordera.
- Salinitat de l'aigua: **35000 ppm**
- *Intermediate loop*<sup>a</sup>: **inclòs**
- Màxima pressió per la membrana: **69 bars**

Els paràmetres econòmics demanats pel programa també es mantenen constants en tot moment. Aquests són:

- Taxa de descompte<sup>b</sup>: **5%**

<sup>a</sup> Descriu a l'apartat 3.3.1.2 d'aquest treball.

- Interès: **5%**
- Augment del cost del combustible: **3%**
- Taxa de carboni: **20\$/t**
- Costos de transport: **inclosos**

Les dades per aquest reactor seran les següents:

- Font d'energia: **Nuclear**
- Temperatura de l'aigua de refrigeració: **25°C**
- Energia tèrmica produïda: **1.800 MWt**
- Eficiència neta: **35%**

Els casos que s'estudien en aquest apartat són valorant un reactor de Cicle de Vapor, un de Cicle de Gas, un de Cicle Combinat i un de Només Calor. Aplicant totes les dades anteriors al Software DEEP 4, els resultats obtinguts són els que es mostren a la Taula 3.5. Els resultats complets es mostren a l'Annex 2:

**Taula 3.5.** Tipus de reactor i resultats obtinguts per cada cas

|         | Tipus de reactor | Cost de l'aigua producte [€/m <sup>3</sup> ] | Cost de l'energia [€/m <sup>3</sup> ] |
|---------|------------------|--|---------------------------------------|
| Cas I   | Cicle de Vapor   | 0,87   | 0,04                                  |
| Cas II  | Cicle de Gas     | 0,89   | 0,05                                  |
| Cas III | Cicle Combinat   | 0,90   | 0,05                                  |
| Cas IV  | Només calor      | 0,92   | 0,01                                  |

*Font: Elaboració pròpia a partir dels resultats del DEEP 4*

Cal destacar tots els casos com a sorprenents. Com s'ha descrit a l'apartat 3.1.1 i 3.1.2 d'aquest document, els costos de producció d'aigua dolça per aquestes dessalinitzadores són de 0,35 €/m<sup>3</sup>, en el cas del Prat de Llobregat, i 0,61€/m<sup>3</sup> en el cas de la Tordera. Són valors més econòmics enfront els 0,87 €/m<sup>3</sup> que calcula el *software*, en el cas més econòmic.

<sup>b</sup> Taxa de descompte: El descompte del futur es justifica per la *impaciència* o la *preferència temporal pura*. Les persones prefereixen el consum present que el futur. També per el *risc* i la *incertesa del futur*. Es valora menys un cost o benefici quan major sigui la seva incertesa<sup>29</sup>.



Si ens centrem només en el Cas I el DEEP 4 té associat que el preu del kWh produït per una central nuclear és de 0,057\$/kWh (0,04 €/kWh), tal com està descrit a l'Annex 2. La dessalinitzadora del Prat de Llobregat tenia un cost específic d'energia de 0,08 €/kWh segons la Taula 3.2. Com podem veure, el preu de l'energia de la xarxa de subministrament català és més car que la que ofereix el programa. Tot i així, el cost de producció d'aigua per energia nuclear que proposa el programa continua essent més car.

Caldria aprofundir amb el treball d'aquestes dades per demostrar si els resultats obtinguts són vàlids o no.

### **3.3. Impacte Ambiental**

En aquest projecte es valoren els impactes per contaminació radiològica que pot produir l'aigua resultant d'un procés de dessalinització nuclear, quins efectes pot causar sobre la salut humana i en el medi ambient, tant *in situ* com *ex situ*.

Els impactes sobre el terreny pel què fa a la construcció de la central, no s'esmenten en el contingut d'aquest treball. És així perquè els impactes i riscos associats tant en els processos de dessalinització com en el cicle nuclear, ja han estat estudiats a fons. Així doncs, aquest document només es centre en l'aigua producte.

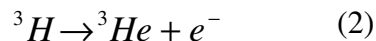
#### **3.3.1. Triti**

El triti es produeix de forma natural al medi ambient amb unes concentracions molt baixes. La majoria es troba en forma d'aigua tritiada que fàcilment es difon per l'atmosfera, per cossos aquàtics, sòl i roques. A mitjans dels anys cinquanta i principis dels seixanta, una gran quantitat de triti es va dispersar àmpliament durant molts tests d'armes nuclears a l'atmosfera. El pic el trobem el 1963 i des d'aleshores ençà ha anat disminuint. Les fonts actuals de triti inclouen reactors nuclears comercials, espais de recerca nuclear i indústries de producció d'armament governamentals<sup>30</sup>. És per aquest motiu que cal estudiar la possibilitat de trobar-lo en plantes de dessalinització nuclear.

El triti (<sup>3</sup>H o T) és un isòtop radioactiu de l'hidrogen, que és capaç de travessar diverses barreres físiques en el procés de dessalinització fins a l'aigua producte. L'hidrogen fonamental està format per un protó mentre que el triti està format per un protó i dos

neutrons. Això fa que tingui les mateixes propietats químiques que l'hidrogen i que, per tant, pugui formar aigua tritiada.

No constitueix un perill extern significatiu de radiació ja que és un emissor de partícules beta de baixa energia, que tenen un poder de penetració molt baix. El problema es presenta quan l'aigua tritiada penetra el cos a través de la pell, és ingerida o inhalada. El triti és absorbit pels teixits del cos en àrees molt localitzades. La desintegració de  ${}^3\text{H}$  a  ${}^3\text{He}$ , el seu fill (període de semidesintegració: 12,36 anys  $\pm 0,03$ ), és biològicament significativa.



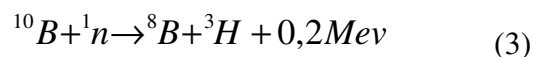
El recorregut de les partícules beta del triti és molt curt, d'uns  $6\mu\text{m}$ . L'energia d'aquesta varia entre 0 i 18,6 KeV<sup>31</sup>.

A més, també és important la diferència de massa que hi ha en la substitució del  ${}^3\text{H}$  per el  ${}^1\text{H}$  a les cèl·lules. Els efectes produïts per l'increment de massa comencen tant o més ràpid que els deguts a la desintegració d'aquest isòtop<sup>32</sup>.

Com en tota radiació ionitzant, l'exposició al triti augmenta el risc a desenvolupar càncer. Tanmateix, com s'ha esmentat, és un emissor de baixa energia i deixa el cos relativament ràpid<sup>30</sup>.

### 3.3.1.1. Com es produeix?

El triti es pot produir de moltes maneres. Pot ser a partir de la unió de dos àtoms de deuteri<sup>33</sup>, captura neutrònica del  ${}^6\text{Li}$  o del  ${}^{14}\text{N}$ <sup>34</sup>, o per la reacció produïda per el  ${}^9\text{Be}$  amb el deuteri ( ${}^2\text{H}$ )<sup>35</sup>. Tot i així, als reactors nuclears, és produït principalment pel  ${}^{10}\text{B}$  per captura neutrònica als *Pressurized Water Reactor* (PWR)<sup>36</sup>. La reacció que es produeix és la següent:



### 3.3.1.2. Prevenció de l'impacte

En aquest aspecte, cal tenir en compte el tipus de tecnologia que estem estudiant. Per les plantes d'Osmosi Inversa amb un funcionament a partir d'un reactor nuclear, el risc de canvi físic en l'aigua dessalinitzada és nul, ja que no s'aprofita l'energia calorífica

emesa pel reactor per escalfar l'aigua de mar. D'aquesta manera, la font d'energia pot estar a la mateixa central o a molts quilòmetres de distància que no contaminarà l'aigua producte de cap manera.

És en el cas de les plantes dessalinitzadores de tipus MSF i MED, que funcionen aprofitant l'energia calorífica sortint del reactor, on es podria donar el cas de contaminació radiològica de l'aigua. S'escalfa aquest fluid per conducció tèrmica entre la canonada sortint del reactor i la que conté aigua per dessalinitzar, i això podria afavorir la producció de triti en aquesta aigua.

Segons Anastov i Khamis<sup>36</sup>, la dessalinització nuclear inclou característiques i pràctiques de seguretat. La més específica és la del bucle d'aïllament (*isolation loop*), que és un circuit d'aigua que circula a una pressió més alta que el bucle nuclear (*nuclear loop*), i idealment, a menys pressió que el bucle de dessalinització (*desalination loop*). A la Figura 4 es pot veure un esquema del que és un bucle d'aïllament.

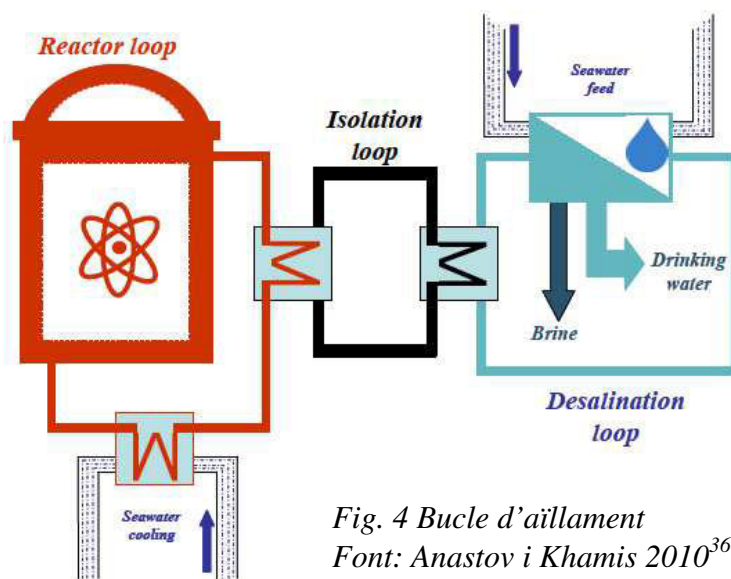


Fig. 4 Bucle d'aïllament  
Font: Anastov i Khamis 2010<sup>36</sup>

Aquesta pressió del bucle d'aïllament preveu de possibles fugues de refrigerant contaminat del corrent del reactor cap al corrent dessalinitzat. A part d'aquest bucle d'aïllament, l'aigua produïda és retinguda a diversos tancs on es pot mesurar els nivells d'activitat de triti abans de ser abocada a la xarxa de distribució.

### 3.3.1.3. Casos de triti en aigua producte

L'experiència amb aquesta tecnologia no ens mostra casos de contaminació o problemes de salut degut al triti en aigua dessalinitzada. Segons Muralev<sup>37</sup>, en el cas de Kazakhstan, la màxima concentració de triti trobada en el corrent de dessalinització va ser de 6 Bq/L. Des de la perspectiva dels límits regulatoris de triti en aigua potable (Taula 3.6)<sup>38</sup>, l'aigua produïda es trobaria dins d'un llindar segur.

**Taula 3.6** Nivells de triti permesos en aigua potable

| <i>País</i> | <i>Límit de Triti (Bq/L)</i> |
|-------------|------------------------------|
| Austràlia   | 76103                        |
| Canadà      | 7000                         |
| Europa      | 100                          |
| Kazakhstan  | 7700                         |
| Suïssa      | 100000                       |
| EUA         | 740                          |
| OMS         | 10000                        |

*Font: Anastov i Khamis (2010)*

#### 4. Conclusions i altres línies de treball

Els processos de dessalinització han donat resposta a aquells països amb necessitats de consum d'aigua més altes que els recursos que disposen. És el cas del Golf d'Aràbia on tenen un dèficit hídric important degut als pocs recursos de què disposen i l'augment del consum dels últims anys per la industrialització de l'economia, l'augment de l'agricultura i la demografia.

La tendència del consum d'aigua a nivell mundial és d'augmentar en el proper segle. Es preveu que el consum mundial d'aigua el 2050 podria gairebé duplicar el de 2009. La tecnologia de dessalinització pot ajudar a satisfer aquestes necessitats.

La tecnologia nuclear en dessalinització és una opció per aquells països que, a part de tenir pocs recursos hídrics, tenen recursos energètics limitats. És el cas de Japó que, pel fet de ser un arxipèlag, té uns recursos limitats.

Els resultats obtinguts amb el software DEEP 4 per a la possible transformació de les plantes dessalinitzadores catalanes en dessalinitzadores nuclears no s'ajusten a les prediccions que esmenten alguns autors d'una producció d'aigua més econòmica. Els resultats d'aquest document exposen que les dessalinitzadores catalanes produeixen aigua més econòmicament en l'actualitat que si produïssin aigua potable a partir d'un reactor nuclear. Caldria aprofundir en la viabilitat econòmica d'aquesta tecnologia.

El software DEEP 4 permet l'anàlisi de moltes més opcions no estudiades en aquest projecte. Opcions com carbó, petroli o gas. Una nova línia de treball podria ser la recerca d'una font de producció d'aigua més econòmica.

Les motivacions dels països del Golf d'Aràbia que s'han trobat per la construcció de plantes de dessalinització nuclear no són fermes i semblen d'opinió periodística poc contrastada. Caldria augmentar la recerca en aquesta apartat.

Hi ha sistemes eficaços per prevenir la contaminació radiològica. És el cas del *isolation loop* o bucle d'aïllament i controls que mesuren l'activitat del possible triti en l'aigua.

No s'han trobat casos de contaminació per triti a l'aigua producte de les plantes de dessalinització nuclear existents.

**Bibliografia**

- (1) DICCIONARI.CAT, Dessalinitzar [pàgina web]. Barcelona; 2013 (consulta el 7 de maig de 2013). Disponible a:  
<http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0159594>
- (2) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Introduccion of nuclear desalination [internet]. Viena; 2000 (consulta el 7 de maig de 2013). Disponible a:  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS400\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS400_scr.pdf)
- (3) WORLDWATER, Installed Desalination Capacity by Year, Number of Plants and Total Capacity, 1945 to 2004 [Internet] 2004 (Consulta el 8 de maig de 2013). Disponible a: <http://www.worldwater.org/data20062007/Table22.pdf>
- (4) BASF, THE CHEMICAL COMPANY, Desalination: every drop counts [pàgina web]. New Jersey; 2013 (consulta el 8 de maig de 2013). Disponible a:  
[http://www.performancechemicals.basf.com/ev/internet/watersolutions/en/desalination/index?WT.mc\\_id=60107&WT.srch=1&WT.adw=desalination%20water%20plant](http://www.performancechemicals.basf.com/ev/internet/watersolutions/en/desalination/index?WT.mc_id=60107&WT.srch=1&WT.adw=desalination%20water%20plant)
- (5) WORLDWATER, 100 Largest Desalination Plants Planned, in Construction, or in Operation [Internet], 2005 (Consulta el 7 de maig de 2013). Disponible a:  
<http://www.worldwater.org/data20062007/Table21.pdf>
- (6) AL-MUTAZ I. S. Potential of nuclear desalination in the Arabian Gulf Countries [Internet]. King Saud University: Elsevier; 2000 [consulta el 14 de novembre de 2012] Disponible a:  
<http://faculty.ksu.edu.sa/Almutaz/Research/Potential%20of%20nuclear%20desalination%20in%20the%20Arabian%20Gulf%20countries.pdf>
- (7) NIMAH M. N., Water Resources. Arab Environment: Future Challenges [Internet] 2008 (Consulta el 19 de novembre de 2012). Disponible a:  
<http://www.afedonline.org/afedreport/english/book5.pdf>
- (8) IAEA, Desalination Economic Evaluation Program: Users manual [Internet]. Vienna; 2000 [Consulta el 5 de febrer de 2013]. Disponible a: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-14.pdf>
- (9) ALMUTAZ I. S., AL-NAMLAH. Characteristics of dual purpose MSF distillation plants. [Internet]. Chemical Engineering Department, College of Engineering, King Saud University; març 2004 [Consulta el 29 d'abril de 2013]. Disponible a:  
<http://faculty.ksu.edu.sa/Almutaz/Research/Characteristics%20of%20dual%20purpose%20MSF%20desalination%20plants.pdf>

- (10) IAEA, Introduction of Nuclear Desalination [Internet]. Vienna; 2000 [Consulta el 30 d'abril de 2013]. Disponible a:  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS400\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS400_scr.pdf)
- (11) KUPITZ J. Nuclear energy for seawater desalination: Updating the record. IAEA Bulletin [Internet]. 1995 [consulta el 21 de setembre de 2012] 2, 21-24. Disponible a:  
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull372/37204782124.pdf>
- (12) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Technical Reports Series nos. 24, 51 i 80 [Internet]. 1964 – 1967 [Consulta el 17 d'abril de 2013]. Disponible a: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/Series/80/Technical-Reports-Series>
- (13) WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, Water Facts and Trends [Internet]. Geneva; 2010 [Consulta el 17 de desembre de 2012]. Disponible a:  
[http://www.unwater.org/downloads/Water\\_facts\\_and\\_trends.pdf](http://www.unwater.org/downloads/Water_facts_and_trends.pdf)
- (14) UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROSPECT, Freshwater resources: volume by continent [Internet]. Nairobi, Kenya; 2008 [Consulta el 2 de gener de 2013]. Disponible a: <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/article32.html>
- (15) UNITED NATIONS, World Populations Prospects, the Revision [Internet]. New York: Department of Economic and Social Affairs; 2009 [consulta el 21 de desembre de 2012]. Disponible a:  
[http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2008/wpp2008\\_highlights.pdf](http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2008/wpp2008_highlights.pdf)
- (16) FISHER A., MARTINEZ S. Global Population Distribution Analysis. Department of Earth and Environmental Science [Internet]. University of Texas at San Antonio; 2008 [Consulta el 4 de gener de 2013]. Disponible a:  
[http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/EES6513/Projects/Amber\\_Sergio.pdf](http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/EES6513/Projects/Amber_Sergio.pdf)
- (17) IAEA, Environmental Impact Assessment of Nuclear Dessalination [Internet]. Vienna; 2010 [Consulta el 12 d'abril de 2013]. Disponible a: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1642\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1642_web.pdf)
- (18) IAEA, Status of design concepts of nuclear desalination plants [Internet]; Vienna 2002 [consulta el 29 d'abril de 2013]. Disponible a: [http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1326\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1326_web.pdf)
- (19) ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Water & Sustainability (Volume 3): US Water Consumption for Power Production – The Next Half Century, EPRI, Palo Alto (2002). Disponible a:



- <http://www.circleofblue.org/waternews/wp-content/uploads/2010/08/EPRI-Volume-3.pdf>
- (20) NYTEKNIK, Snart står Japans Kärnkraft Stilla [pàgina web] Estocolm; 2012. (Consulta el 3 de maig de 2013) Disponible a:  
[http://www.nyteknik.se/nyheter/energi\\_miljo/karnkraft/article3436603.ece](http://www.nyteknik.se/nyheter/energi_miljo/karnkraft/article3436603.ece)
- (21) ATOMIC POWER REVIEW, Ohi reactor restarts in Japan fully approved [pàgina web] Eastern; 2012. (Consulta el 3 de maig de 2013). Disponible a:  
<http://atomicpowerreview.blogspot.com.es/2012/06/ohi-reactor-restart-in-japan-fully.html>
- (22) TAIPEI TIMES, Japan approves two reactors restarts, [pàgina web] Tokyo; 2012 (Consulta el 3 de maig de 2013). Disponible a:  
<http://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2012/06/17/2003535527>
- (23) RT, Nuclear revival: Japan to re-launch six reactors in 2013, [pàgina web] USA; 2013 (Consulta el 3 de maig de 2013). Disponibles a:  
<http://rt.com/news/japan-nuclear-energy-return-854/>
- (24) FARAH J., Saudi Arabia looks to develop own nuclear power [Internet]; 2012 (consulta el 7 de març de 2013). Disponible a: <http://www.wnd.com/2012/04/saudi-arabia-looks-to-develop-own-nuclear-power/>
- (25) AIGÜES TER LLOBREGAT, Declaracions Ambientals de 2009, 2010 i 2011 [Internet]. Sant Joan Despí; 2012 [Consulta el 13 de febrer de 2013]. Disponible a:  
<http://www.atll.cat/ca/page.asp?id=73>
- (26) AGENCIA CATALANA DE L'AIGUA, Dessalinitzadora de la Tordera [Internet]. Barcelona; 2011 [Consulta el 13 de febrer de 2013]. Disponible a:  
[http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/sensibilitzacio/recursos\\_pedagogics/posters\\_quaderns\\_i\\_fulletons/poster\\_ITAM\\_tordera.pdf](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/sensibilitzacio/recursos_pedagogics/posters_quaderns_i_fulletons/poster_ITAM_tordera.pdf)
- (27) ACA. Memòries de l'Agència [pàgina web]. Barcelona: 2000-2013 [Consulta el 14 de febrer de 2013]. Disponible a:  
[http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=P16800335891241779668252](http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P16800335891241779668252)
- (28) IAEA, Desalination Economic Evaluation Program (DEEP) [pàgina web] Viena: 2010 [Consulta el 25/02/2013]. Disponible a:  
<http://www.iaea.org/NuclearPower/Desalination/>

- (29) PADILLA E, Equidad Intergeneracional y Sostenibilidad. Las Generaciones Futuras en la Evaluación de Políticas y Proyectos [Internet]. Departament d'Economia Aplicada Universitat Autònoma de Barcelona, 2001. [Consulta el 18 de març de 2013]. Disponible a:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3986/epr1de2.pdf;jsessionid=A796A88C7B1EBEF8EC35292A271D323D.tdx2?sequence=1>
- (30) U.S ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY, Radiation Protection Tritium [pàgina web]. Washington D.C: 2012 [Consulta el 4 d'abril de 2013]. Disponible a:  
<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/tritium.html#environment>
- (31) UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Handbook: Tritium Handling and Safe Storage, US DOE, Washington DC (1999)
- (32) JACOBS D.G., Sources of tritium and his behavior upon release to the environment [Internet]. U.S.ATOMIC ENERGY COMMISSION/Division of Technical Information, 1968. [Consulta el 2 d'abril de 2013]. Disponible a:  
<http://www.ornl.gov/info/reports/1968/3445605445907.pdf>
- (33) OLIPMT M. L., HARTECK P., RUTHERFORD, Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen, *Nature*, 133(3359): 413 (Mar. 17, 1934).
- (34) CHADWICK J., GOLDHABER M., Disintegration by Slow Neutrons, *Nature*, 135(3402): 65 (Jan. 12, 1935).
- (35) O'NEAL R. D.,GOLDHADER M., Radioactive Hydrogen from the Transmutation of Beryllium by Deuterons, *Phys Rev.*, 58(11): 1086-1087 (June 1, 1940).
- (36) ANASTASOV V., KHAMIS I., Environmental Issues Related to Nuclear Desalination, [Internet] World Academy of Science, Engineering and Technology 42, 2010. [Consulta el 2 d'abril de 2013]. Disponible a:  
<http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-238.pdf>
- (37) MURALEV E. D., Experience in the application of nuclear energy for desalination and industrial use in Kazakhstan, in Nuclear heat applications: Design aspects and operating experience, IAEATECDOC- 1056, IAEA, Vienna (1998) 361–368

- (38) ANASTASOV V., KHAMIS I., Nuclear desalination – environmental impacts and implications for planning and monitoring activities. The Royal Society of Chemistry, 2010 - Journal of Environmental Monitoring [Internet]. 2009 [consulta el 16 de setembre de 2012] 12, 50-57. Disponible a:  
<http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/EM/b907794d>

# **ANNEX 1**

## **Informe ACA**



## Agència Catalana de l'Aigua

Provença, 204-208  
08036 Barcelona  
Tel. 93 567 28 00  
Fax 93 567 27 80  
NIF Q 0801031 F  
SI2012001290

Sr.Serra,

En relació amb la vostra sol·licitud referent al consum energètic, producció d'aigua i costos que genera la Planta Dessalinitzadora de la Tordera, us comuniquem que:

- La producció nominal anual aigua dessalinitzada és de  $20 \text{ hm}^3 / \text{any} = 57.600 \text{ m}^3/\text{d}$ .  
La producció real està directament relacionada amb l'estat de la resta de reserves hídriques amb la qual cosa podem parlar d'un rang variable però no superior als  $20 \text{ hm}^3/\text{any}$ .
- La tarifa d'explotació ofertada per l'adjudicatari del "Contracte de concessió d'obra pública per a la redacció del projecte, construcció i explotació de la ITAM Tordera" descrita a la clàusula segona del contracte es descomposa en tarifes fixes i tarifes variables. Les tarifes variables s'apliquen sobre cada  $\text{m}^3$  d'aigua producte generada per la planta. Les tarifes fixes computen mensualment independentment de la quantitat d'aigua que es produeixi.  
Tarifes fixes: l'Adjudicatari del contracte dalt esmentat té dret a la percepció ordinària de l'import total resultant de l'aplicació de les tarifes fixes (energètiques i no energètiques), és a dir, 83.392,79 €/mes (IVA exclòs) amb tarifes revisades fins al desembre de 2010.  
Tarifes variables: l'Adjudicatari del contracte dalt esmentat té dret a la percepció ordinària de l'import total resultant de l'aplicació de les tarifes variables (energètiques i no energètiques) sobre cada  $\text{m}^3$  d'aigua producte generada. En aquest cas, parlem de 0,61 €/m<sup>3</sup> (gener 2011).
- Consum energètic anual: 72.800.000 KW / any.
- Sí Existeixen memòries anuals. A disposició de consulta a les nostres oficines per part de qualsevol interessat. Poden posar-se en contacte amb el Sr. Xavier Fernàndez per aquest tema.

Atentament,

Adjunt a Gerència  
Agència Catalana de l'Aigua.  
[aca@gencat.cat](mailto:aca@gencat.cat)

# **ANNEX 2**

## **Resultats complets DEEP 4**