

# **CAREM: VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA UTILIZACIÓN DEL PRIMER REACTOR DE POTENCIA ARGENTINO PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUA**

**Autor: Ing. JUAN IGNACIO CATTANEO**

**Director de Tesis: Dr. OSVALDO AZPITARTE**

**Buenos Aires, 2019**



**MAESTRÍA INTERDISCIPLINARIA EN ENERGÍA**

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE LA ACTIVIDAD REGULATORIA ENERGÉTICA**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a mi director de tesis, el Dr. Ing. Osvaldo Azpitarte, por el compromiso y dedicación aportados en la tesis, sin los cuales no habría sido posible culminar el trabajo.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica, y más específicamente al proyecto CAREM25 por brindarme el espacio y recursos para que pueda cursar la maestría.

A la Ing. Cecilia Conti, experta en el tema de desalinización nuclear, por ser una fuente de consulta invaluable.

A mis padres, por inculcarme el valor del sacrificio y el esfuerzo para lograr los objetivos que uno se plantea.

Por último, pero especialmente, a mi esposa Paula y mi hija Francisca, por ser mi apoyo todos los días, y por la paciencia de aceptar y entender el tiempo dedicado a la tesis, que en definitiva es tiempo que les quité a ellas.

## **RESUMEN**

El estrés hídrico se presenta como uno de los principales problemas que debe afrontar la humanidad en los próximos años, a tal punto que estudios demuestran que para el año 2025 más de 2.800 millones de personas lo sufrirán. Los métodos de desalinización para poder enfrentar este problema, presentan consumos muy elevados de energía, generalmente proveniente de hidrocarburos. Ante este panorama, la desalinización utilizando energía nuclear como fuente de energía se presenta como una de las alternativas más alentadoras a futuro.

La presente tesis busca demostrar la factibilidad técnica, económica y ambiental de utilizar el reactor CAREM, primer reactor de potencia diseñado por la Argentina, y primero de su tipo en el mundo, para desalinizar agua en un país que se demuestre sea el más apropiado para alojar este proyecto.

## **PALABRAS CLAVE**

Desalinización, Nuclear, CAREM

## INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>2</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>PALABRAS CLAVE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1.    DEFINICIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN .....	8
1.2.    OBJETIVOS.....	8
1.2.1.    OBJETIVO GENERAL .....	8
1.2.2.    OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
1.3.    METODOLOGÍA .....	9
<b>2 PROBLÉMÁTICA DEL AGUA</b> .....	<b>11</b>
2.1.    DISPONIBILIDAD DEL AGUA .....	11
2.2.    FALTA DE AGUA .....	14
2.3.    SELECCIÓN DEL PAÍS DE ESTUDIO.....	17
2.3.1.    SELECCIÓN DEL PAÍS DE ESTUDIO .....	18
2.3.2.    CRITERIOS DE EVALUACIÓN .....	18
2.3.3.    RESULTADOS OBTENIDOS.....	19
<b>3 CARACTERIZACIÓN DE EMIRATOS ÁRABES UNIDOS</b> .....	<b>21</b>
3.1.    ASPECTOS GENERALES.....	21
3.1.1.    GEOGRAFÍA .....	21
3.1.2.    DEMOGRAFÍA .....	22
3.1.3.    RIESGO SÍSMICO.....	24
3.1.4.    ECONOMÍA .....	25
3.1.4.1.    PBI .....	25
3.1.4.2.    AGRICULTURA E INDUSTRIA .....	26
3.1.5.    RECURSOS HÍDRICOS .....	28
3.1.6.    USO DEL AGUA .....	30
3.2.    SITUACIÓN ENERGÉTICA .....	31
3.2.1.    RECURSOS ENERGÉTICOS.....	31
3.2.2.    PLAN NUCLEAR.....	32
<b>4 DESALINIZACIÓN DE AGUA</b> .....	<b>34</b>
4.1.    INTRODUCCIÓN .....	34
4.2.    TECNOLOGÍAS EXISTENTES.....	36
4.2.1.    PROCESOS DE DESALINIZACIÓN TÉRMICA.....	37
4.2.1.1.    DESALINIZACIÓN FLASH MULTITAPA (MSF) .....	37
4.2.1.2.    DESALINIZACIÓN MEDIANTE MÚLTIPLE EFECTO (MED) .....	40
4.2.1.3.    DESALINIZACIÓN MEDIANTE COMPRESIÓN DE VAPOR (VC).....	42
4.2.2.    PROCESOS DE DESALINIZACIÓN DE MEMBRANA .....	43
4.2.2.1.    DESALINIZACIÓN MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA (RO).....	43

4.2.2.2.	DESALINIZACIÓN MEDIANTE ELECTRODIÁLISIS (ED) .....	45
4.2.3.	COMPARACIÓN DE PROCESOS .....	46
4.2.4.	DESALINIZACIÓN MEDIANTE PLANTAS HÍBRIDAS.....	47
4.3.	DESALINIZACIÓN DE AGUA EN EAU .....	49
<b>5</b>	<b>ENERGÍA NUCLEAR – REACTOR CAREM .....</b>	<b>52</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN .....	52
5.2.	ENERGÍA NUCLEAR .....	52
5.2.1.	ESTRUCTURA ATÓMICA E ISÓTOPOS .....	52
5.2.2.	ENERGÍA NUCLEAR, FUERZAS DE ENLACE Y RADIOACTIVIDAD.....	52
5.2.3.	REACCIONES NEUTRÓNICAS – FISIÓN NUCLEAR .....	53
5.2.4.	USOS DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR .....	54
5.2.5.	COMBUSTIBLE NUCLEAR.....	55
5.3.	TIPOS DE REACTORES.....	56
5.3.1.	CONCEPTOS BÁSICOS .....	56
5.3.2.	REACTOR AGUA PRESURIZADA (PWR).....	57
5.3.3.	OTROS TIPOS DE REACTORES.....	58
5.3.4.	REACTORES NUCLEARES EN EL MUNDO.....	58
5.3.5.	GENERACIÓN DE REACTORES .....	61
5.3.6.	REACTORES SMR .....	62
5.3.6.1.	CONCEPTO .....	62
5.3.6.2.	SMRS EN OPERACIÓN, EN CONSTRUCCIÓN Y EN ETAPA DE INGENIERÍA CONCEPTUAL .....	62
5.4.	REACTOR CAREM.....	64
5.4.1.	GENERALIDADES .....	64
5.4.2.	PROTOTIPO: CAREM25.....	67
5.4.3.	VERSIÓN COMERCIAL - CAREM480 .....	68
5.5.	SMRS EN ESTADO AVANZADO EN OTROS PAÍSES .....	70
5.5.1.	KLT-40S .....	70
5.5.2.	RITM-200 .....	72
5.5.3.	HTR-PM .....	73
5.5.4.	ACPR50S.....	75
5.5.5.	SMART .....	76
5.5.6.	NUSCALE .....	78
<b>6</b>	<b>DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD TÉCNICA.....</b>	<b>80</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN .....	80
6.2.	DESALINIZACIÓN NUCLEAR.....	80
6.2.1.	CONCEPTO .....	80
6.2.2.	STATUS Y PROYECCIÓN DE LA DESALINIZACIÓN NUCLEAR .....	81
6.2.3.	ACOPLAMIENTO – ASPECTOS TÉCNICOS .....	82
6.2.4.	ACOPLAMIENTO A UN REACTOR DE POTENCIA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	82

6.2.5.	ACOPLAMIENTO A UN REACTOR DE GENERACIÓN DE CALOR .....	83
6.2.5.1.	ACOPLAMIENTO CON UNA PLANTA MSF .....	84
6.2.5.2.	ACOPLAMIENTO CON UNA PLANTA MED .....	85
6.2.6.	ACOPLAMIENTO DE A UN REACTOR DE COGENERACIÓN .....	85
6.2.7.	ACOPLAMIENTO – MEDIDAS DE SEGURIDAD .....	87
6.3.	FACTIBILIDAD TÉCNICA DE ACOPLAMIENTO DEL CAREM A UNA PLANTA DESALINIZADORA .....	87
6.3.1.	ACOPLAMIENTO DEL CAREM A RO .....	87
6.3.2.	ACOPLAMIENTO DEL CAREM A MSF .....	89
6.3.3.	ACOPLAMIENTO DEL CAREM A MED .....	89
6.3.4.	ACOPLAMIENTO DEL CAREM A PLANTAS HÍBRIDAS .....	90
6.4.	FACTIBILIDAD TÉCNICA DE INSTALACIÓN DEL CAREM PARA DESALINIZACIÓN NUCLEAR EN LOS EAU .....	91
<b>7</b>	<b>DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD ECONÓMICA .....</b>	<b>93</b>
7.1.	INTRODUCCIÓN .....	93
7.2.	PLANTA DE DESALINIZACIÓN .....	93
7.2.1.	PLANTA DE DESALINIZACIÓN PROYECTADA .....	93
7.3.	COSTO DE GENERACIÓN .....	94
7.3.1.	CONSIDERACIONES GENERALES .....	94
7.3.2.	GENERACIÓN CON UN CICLO COMBINADO DE GAS (CCG) – ESCENARIO BASE 95	
7.3.3.	GENERACIÓN CON EL CAREM COMERCIAL .....	99
7.3.4.	GENERACIÓN CON UN CICLO COMBINADO DE GAS (CCG) – ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL PRECIO DEL COMBUSTIBLE .....	100
7.4.	EFFECTOS INTANGIBLES Y EXTERNALIDADES .....	101
<b>8</b>	<b>DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD AMBIENTAL .....</b>	<b>104</b>
8.1.	INTRODUCCIÓN .....	104
8.2.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA DESALINIZACIÓN DE AGUA .....	104
8.2.1.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA TOMA DE AGUA .....	104
8.2.2.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA DESCARGA DE SALMUERA .....	106
8.2.3.	OTROS IMPACTOS AMBIENTALES .....	108
8.3.	IMPACTO AMBIENTAL DE LA FUENTE DE ENERGÍA ACOPLADA .....	109
8.3.1.	IMPACTO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR .....	109
8.3.2.	IMPACTO DE LA GENERACIÓN CON CENTRALES A GAS .....	111
8.4.	CONCLUSIONES .....	114
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>115</b>
9.1.	CONCLUSIONES .....	115
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>118</b>
<b>11</b>	<b>INDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES .....</b>	<b>122</b>
11.1.	ÍNDICE DE FIGURAS .....	122

11.2.	ÍNDICE DE TABLAS .....	124
11.3.	ÍNDICE DE ECUACIONES.....	124
<b>12</b>	<b>GLOSARIO DE SIGLAS .....</b>	<b>125</b>
<b>13</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>127</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1. Definición del tema de investigación

Se investiga la factibilidad técnica del uso de la energía nuclear, particularmente de la Central Argentina de Reactores Modulares, CAREM, primer reactor de potencia diseñado por la Argentina, para la desalinización de agua en algún país del mundo a definir durante el transcurso de la tesis. En primera instancia, por lo tanto, se define el problema de la falta de agua potable, y se identifican los países o regiones donde esto ocurre. Adicionalmente, dentro de las regiones con la mencionada problemática, se identifican los países que potencialmente son más aptos para alojar un reactor nuclear. Para ello, se analizan distintos factores tales como la existencia de un plan nuclear, condiciones económicas, riesgo sísmico y de tsunami entre otros, lo que permite definir el país óptimo para desarrollar el tema de estudio de la tesis. Se destaca que el estudio se plantea fuera de la Argentina pues pretende reforzar la potencialidad del país de poder exportar el reactor CAREM. A los efectos de darle un marco teórico se describen, además, las distintas tecnologías vigentes para la desalinización, especificando cuáles son las óptimas para la región seleccionada. El tema es reforzado mediante la comparativa tanto económica como ambiental, respecto a otras fuentes de energía disponibles en el país de estudio seleccionado.

Será tarea de otro trabajo estudiar las características que deban tener los acuerdos bilaterales de cooperación entre Argentina y los países involucrados.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo general

Demostrar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la utilización del reactor CAREM para desalinización de agua de mar en el país determinado como óptimo para el estudio durante el desarrollo de la presente tesis.

#### 1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se plantean para el desarrollo del tema de investigación son los siguientes:

- A. Definición del problema.** Estudiar y comprender la problemática de falta de agua en el mundo, identificando aquellos países que, por su situación económica, geográfica, política y disponibilidad de plan nuclear, resulten óptimos para ubicar el reactor CAREM acoplado a una planta desalinizadora.
- B. Caracterización del país seleccionado.** Describir la situación geográfica, hídrica, económica, poblacional, energética, desarrollo del plan nuclear, etc. tanto presente como proyectada en el tiempo en los casos aplicables.
- C. Desalinización de Agua.** Profundizar sobre las distintas tecnologías vigentes para obtener agua potable, entendiendo el funcionamiento y rendimiento de cada una, logrando identificar cual es la mejor tecnología para el país estudiado en función de las características del agua.
- D. Energía Nuclear - CAREM.** Introducir los principios básicos de la energía nuclear, así como de la nueva generación de los reactores denominados "Small Modular Reactor" (SMR), especialmente del Reactor CAREM.
- E. Factibilidad técnica.** Determinar la factibilidad de utilización del Reactor CAREM para alimentar a las plantas de desalinización aptas para el país de estudio.



**F. Factibilidad económica.** Determinar si la desalinización alimentada con el reactor CAREM es económicamente competitiva frente a otras fuentes energéticas de la región.

**G. Factibilidad ambiental.** Determinar si el impacto ambiental generado por la desalinización nuclear es comparable o menor al que se genera mediante otras fuentes de energía

### 1.3. Metodología

Para alcanzar los objetivos específicos identificados en el punto precedente, se desarrollan las siguientes tareas.

- Para alcanzar el objetivo **A – Definición del problema:**

**A.1 – Estrés hídrico.** Se define el concepto y se investigan los parámetros utilizados para determinar las zonas vulnerables a esta problemática. Se identifican, en la actualidad y proyectados a futuros, los países o regiones que lo sufren.

**A.2 – Definición de país de estudio.** En base a los parámetros y países definidos en el objetivo A1- Estrés hídrico, se selecciona el país más apropiado para implementar un programa de desalinización nuclear. Para ello se evalúan aspectos económicos, que permitan solventar la instalación de un proyecto de capital intensivo, aspectos geográficos, principalmente riesgo sísmico y de tsunamis y disponibilidad de un plan nuclear que brinde las instituciones, controles y normas necesarias para instalar un Reactor Nuclear.

- Para alcanzar el objetivo **B – Caracterización del país seleccionado:**

**B.1 – Caracterización socio-económica:** Se describen los aspectos principales del país elegido, tales como cantidad de habitantes actual y proyectada, PBI, actividad industrial, etc. Se representa también la matriz energética.

**B.2 – Caracterización geográfica.** Se describen las características geográficas más relevantes tales como régimen de lluvias, disponibilidad de aguas subterráneas, características del agua de mar, etc. Adicionalmente se analizan las formas de abastecimiento de agua potable existente en el país.

- Para alcanzar el objetivo **C – Desalinización de Agua:**

**C.1 – Tecnologías.** Se estudian y describen las tecnologías vigentes para desalinizar agua, destacando las características técnicas, capacidades y requerimientos energéticos de cada una.

**C.2 – Tecnologías adecuadas para el país en estudio.** En función de las tecnologías estudiadas en la tarea "C.1. - Tecnologías", y de los parámetros del agua relevadas en "B.2. - Características geográficas", se identifican las tecnologías que se presentan como óptimas para el país seleccionado.

- Para alcanzar el objetivo **D – Energía Nuclear – CAREM:**

**D.1 – Concepto energía nuclear.** Se describen las características básicas de la energía nuclear y los distintos usos de la misma.

**D.2 –Comparación de reactores.** Se hace una comparación de otros SMR del mercado, presentando fortalezas y debilidades de cada uno.

**D.3 –CAREM.** Se describe al Reactor CAREM, tanto el prototipo como su versión comercial.

- Para alcanzar el objetivo **E - Factibilidad técnica:**

**E.1 –Factibilidad técnica.** Se analiza la viabilidad técnica de operación del CAREM como fuente de alimentación de energía para las tecnologías de desalinización descritas en

**C.2 – Tecnologías adecuadas para el país de estudio.**

- Para alcanzar el objetivo **F - Factibilidad económica:**

**F.1 –Costos.** Se infieren los costos, tanto de construcción como operación, del CAREM.

**F.2 -Comparación con otras fuentes de energía.** Se compara el costo de la instalación y operación de una planta de generación nuclear con una planta alimentada mediante una fuente alternativa.

- Para alcanzar el objetivo **G - Factibilidad ambiental:**

**G.1 –Efectos ambientales.** Se analizan los principales efectos producidos en el ambiente producto de la operación del reactor CAREM para la desalinización de agua de mar.

**G.1 –Comparación con otra fuente energética.** Se compara el impacto de la energía nuclear para desalinizar agua con el de otras fuentes energéticas disponibles en la región.

## 2 PROBLÉMÁTICA DEL AGUA

### 2.1. Disponibilidad del agua

El agua es esencial en la vida de los seres humanos, ya sea para consumo y subsistencia propia, como para la agricultura o la industria. Por tal motivo desde tiempos antiguos los primeros asentamientos se han ubicados en zonas cercanas a fuentes de agua potable en busca de un mejor desarrollo. Sin embargo, y a pesar de lo esencial que es, solo el 2.5% del agua disponible en la tierra es agua dulce, y de este, más del 70% se encuentra congelado. Sobre el 30% restante, solo el 0.3% se encuentra en ríos y lagos. (ver Figura 1).

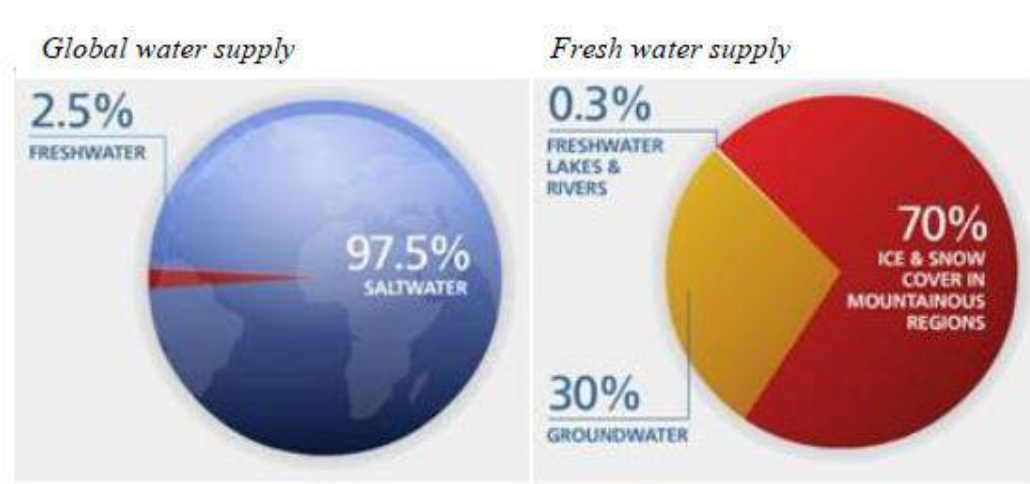


Figura 1 – Disponibilidad de agua dulce en el mundo<sup>1</sup>

Sin embargo, resulta difícil realizar un cómputo de las reservas de agua dulce debido a que la disponibilidad de las mismas se distribuye de forma errática en tiempo y espacio debido a los regímenes de lluvias y escurrimientos. De esta forma, según el año y estación en que se mida las reservas podrán ser mayores o menores. Por lo tanto, para poder establecer las reservas de agua per cápita en cada región se trabaja con promedios anuales que permiten apreciar la heterogeneidad con la que se distribuye el agua en el mundo. Estudios han demostrado que el fenómeno del calentamiento global acrecentará aún más estas diferencias pues, no solo afecta la cantidad de lluvias, sino el régimen hídrico en su totalidad, alterando incluso la disponibilidad y calidad de agua en los acuíferos subterráneos. Éstos últimos representan una de las reservas más importantes de agua dulce ya que proveen agua potable a más del 50% de la población mundial y el 43% del agua utilizada para riego. Lo afirmado anteriormente puede apreciarse en la figura Figura 3 que indica la variación de las zonas en cuanto la posibilidad de inundaciones, medidas con un período de retorno de 100 años, donde hay zonas que proyectan aumentos de inundaciones y otras donde se verán disminuidas.

<sup>1</sup> Hameeteman, E. (2013). *Future water (in)security: facts, figures and predictions*, Global Water Institute, 2013(ref.[16]),p5.

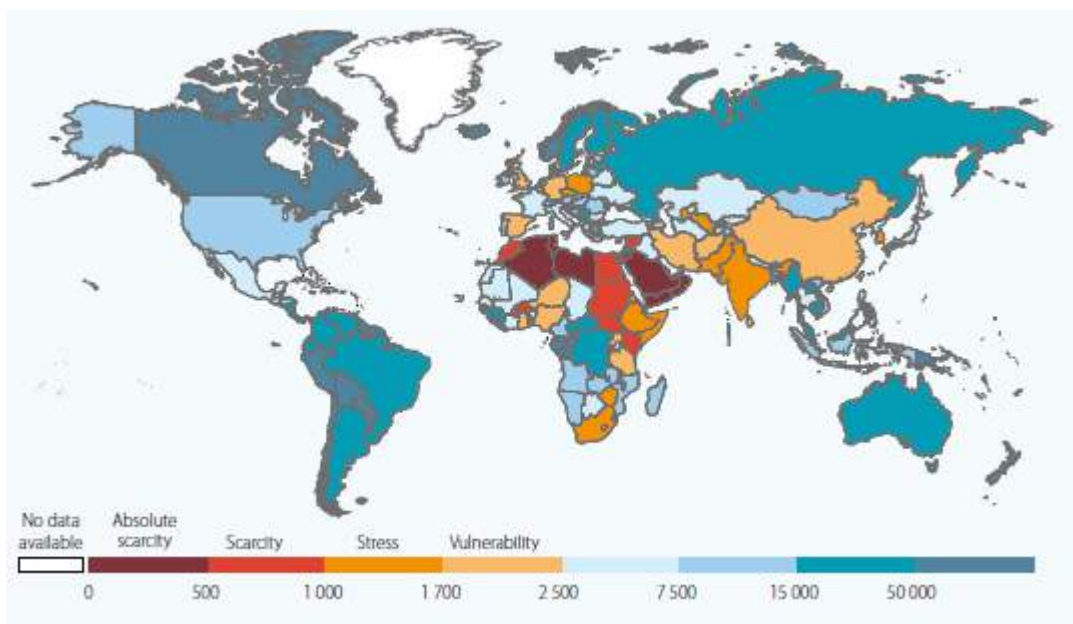


Figura 2 – Recursos hídricos renovables per cápita, en m<sup>3</sup>, en el año 2013<sup>2</sup>

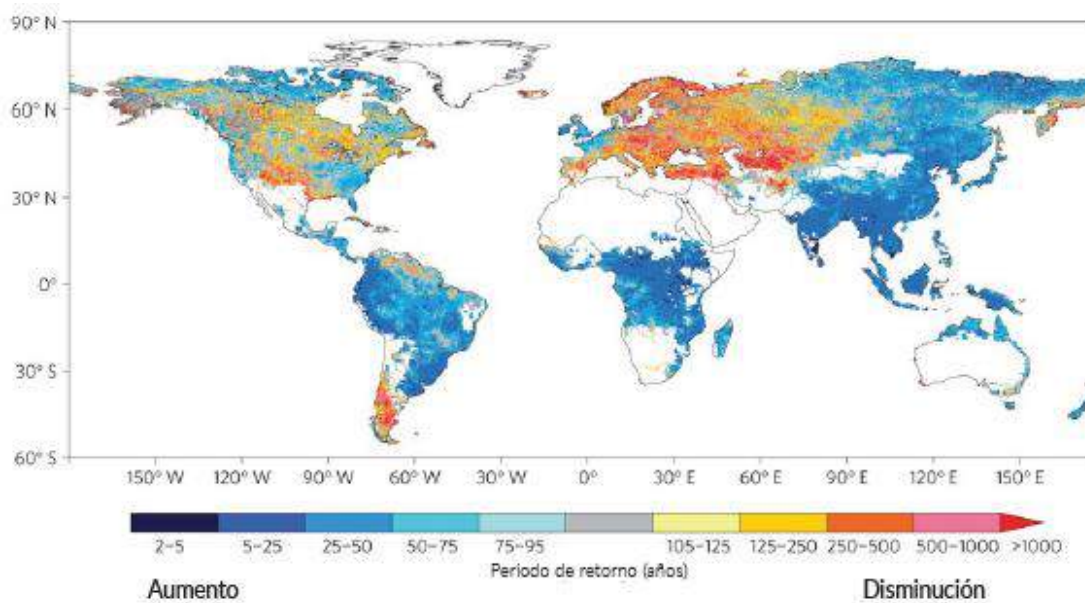


Figura 3 – Cambios pronosticados en la frecuencia de inundaciones<sup>3</sup>

Hasta aquí se ha mencionado la disponibilidad de recursos en función de las causas naturales, sin embargo, las extracciones de agua son determinantes a la hora de estimar la escasez o no del agua. La tasa a la que se retira y consume el agua depende de aspectos socioeconómicos tales como el crecimiento poblacional, desarrollo económico, consumo

<sup>2</sup> **United Nations Water (2015).** *Water for a Sustainable World*, United Nations World Water Development Report 2015, París, Francia(ref.[56]), p.12

<sup>3</sup> **United Nations Water (2017).** *Agua Residual, El recurso desaprovechado*, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, París, Francia.(ref.[58]), p.11

energético y cambio en las costumbres alimenticias. A modo de ejemplo se puede comparar la huella hídrica<sup>4</sup> promedio por persona en distintos países presentado en la Figura 4. Así se aprecia la que países desarrollados como Estados Unidos presentan mayor consumo, por ejemplo, que Argentina o Brasil, y que dicho consumo no necesariamente presenta relación directa con la disponibilidad de agua presentada en la Figura 2.

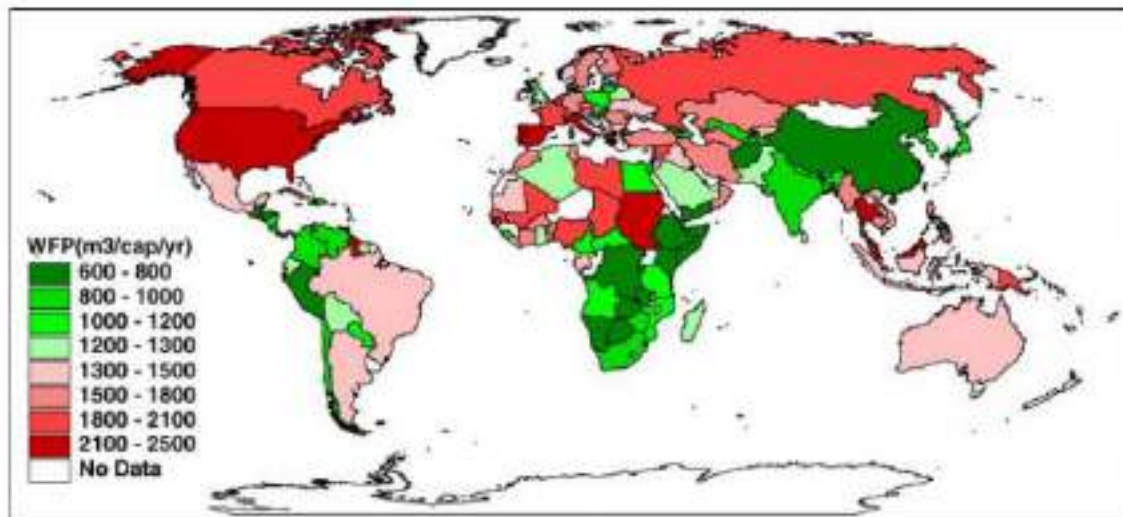


Figura 4 – Huella hídrica promedio por persona, por año, por país.<sup>5</sup>

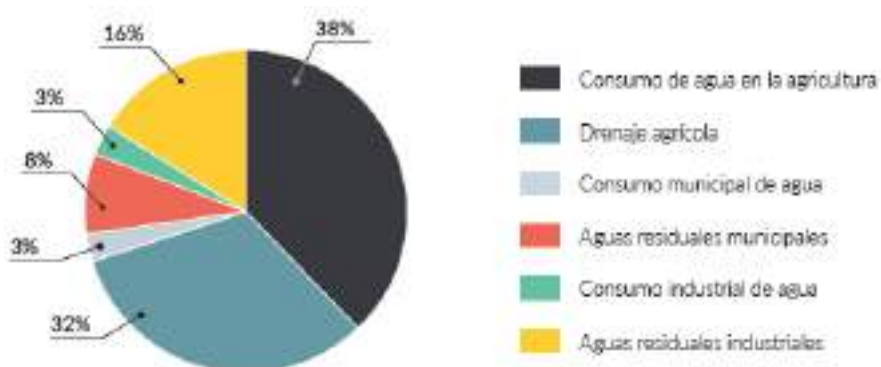


Figura 5 – Destino de las extracciones de agua dulce<sup>6</sup>

Respecto a la población, la misma ha evidenciado un crecimiento exponencial a partir del año 1750 elevando el número de habitantes de la tierra en la actualidad a aproximadamente 7.350 millones (ver Figura 6), lo que aumenta aún más el estrés sobre los recursos hídricos. De hecho,

<sup>4</sup> Huella hídrica es el volumen total de agua dulce utilizados para producir los bienes y servicios consumidos por un individuo, en determinado espacio de tiempo.

<sup>5</sup> Hoekstra, A. y Chapagain, A. (2007), *Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern*, publicado en Libro *Water Resource Manage* (2007), pp. 35-48 (ref. [17]), p.41

<sup>6</sup> Hameeteman, E. (2013). *Future water (in)security: facts, figures and predictions*, Global Water Institute, 2013(ref. [16]), Op. Cit., p.5

se estima que en los últimos 50 años se ha, cuanto menos, triplicado la extracción de agua subterránea.

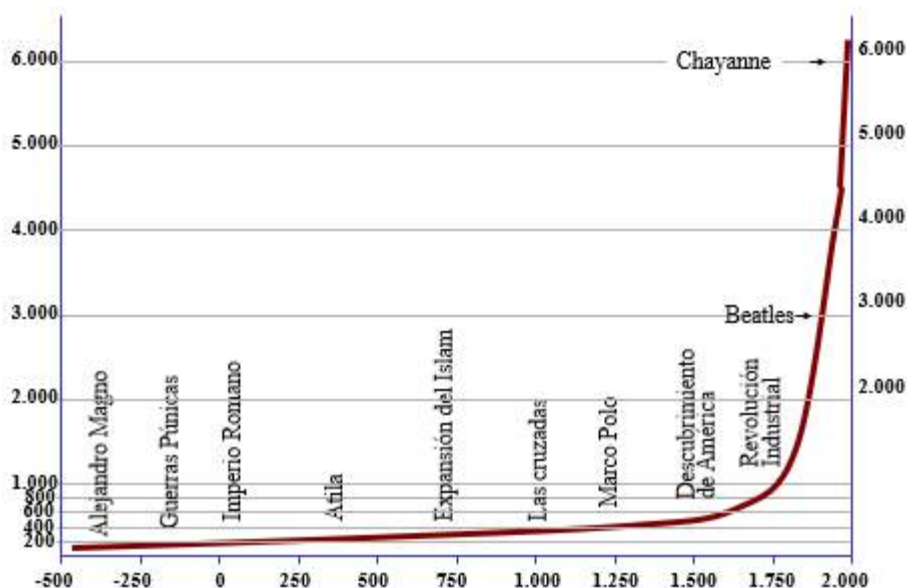


Figura 6 – Población mundial en los últimos 12.000 años y proyectada al 2100

## 2.2. Falta de agua

Antes de proceder a analizar la situación a nivel mundial deben definirse los siguientes conceptos fundamentales, medidos en función de la relación entre el suministro anual de agua disponible y la población.

- Estrés hídrico: un país o región se considera estresada hídricamente cuando la disponibilidad de agua renovable dulce se encuentra entre 1.000 y 2.000 m<sup>3</sup> de agua por persona por año.<sup>7</sup>
- Escasez hídrica: cuando dicho valor desciende por debajo de 1.000 m<sup>3</sup> por persona por años.<sup>8</sup>
- Escasez absoluta: cuando se desciende por de 500m<sup>3</sup> por persona por año.<sup>9</sup>

En la Figura 2 se puede apreciar con la escala de colores los países del mundo, que en promedio tienen estrés (en amarillo) escasez (color ladrillo) o escasez total de agua (color rojo oscuro). Sin embargo, al momento de analizar el problema debe considerarse no solo el promedio anual, sino la variabilidad regional y mensual. De esta forma, estudios presentados en el *World Water Development Report* han demostrado que dos tercios de la población mundial vive en zonas

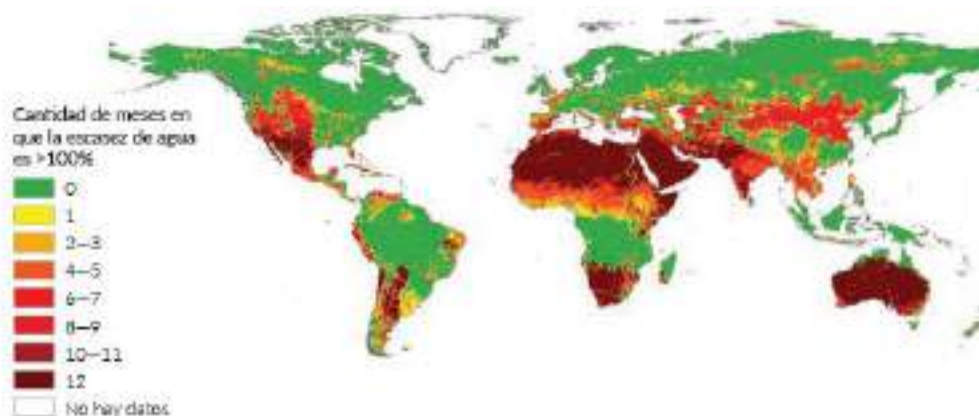
<sup>7</sup> International Atomic Energy Agency (2000). *Introduction of Nuclear Desalination*, IAEA-TRS 400, Viena, Austria.(ref. [22]), p.18

<sup>8</sup> Ibídem.

<sup>9</sup> Ibídem.



que presentan escasez de agua al menos un mes al año, tal como se puede apreciar en colores amarillos y rojos en la Figura 7. Es importante tener en cuenta este factor debido a que trabajar con los promedios anuales puede distorsionar la realidad que afecta gran parte del año a varias regiones. Adicionalmente, dicho gráfico permite apreciar la variabilidad de estrés en distintas zonas dentro de un mismo país, especialmente en aquellos de mayor dimensión como India, Brasil y China (ver Figura 7).



**Figura 7 – Cantidad de meses por año en el que volumen de agua superficial y subterránea que se extrae y no se devuelve es mayor al 100%<sup>10</sup>**

Otros estudios, como los presentados por el GWI<sup>11</sup>, estiman que actualmente 700 millones de personas, en 43 países diferentes, sufren o de escasez o estrés hídrico. Si bien esta estadística resulta preocupante en la actualidad, se espera que para el año 2025 el número aumente a 2.800 millones, y 7.000 millones para el 2050.<sup>12</sup> Por otro lado, el *World Resource Institute* ha elaborado su propio mapa para reflejar la relación entre las extracciones de agua y la reposición de agua en los acuíferos de cada país (ver Figura 8) donde se aprecia, al igual que en los estudios presentados anteriormente, que la situación en el mundo es delicada. Este mismo instituto ha presentado proyecciones para el año 2040 que indican que la situación será más grave aún en el futuro (ver Figura 9). En base a dicho mapa se ha elaborado la lista de países que tendrán mayor estrés hídrico en ese año.<sup>13</sup>

<sup>10</sup> United Nations Water (2017). Aguas Residuales, *El recurso desaprovechado*, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, París, Francia. (ref.[58]), p.10

<sup>11</sup> Global Water Institute es un organismo no gubernamental fundado en 2008 para la investigación de problemáticas relacionadas con el agua.

<sup>12</sup> Elizabeth Hameeteman, Op. cit. p.4.

<sup>13</sup> World Resource Institute, (ref. [80]): <http://www.wri.org/resources/charts-graphs/water-stress-country> (acceso el 29/03/2018)

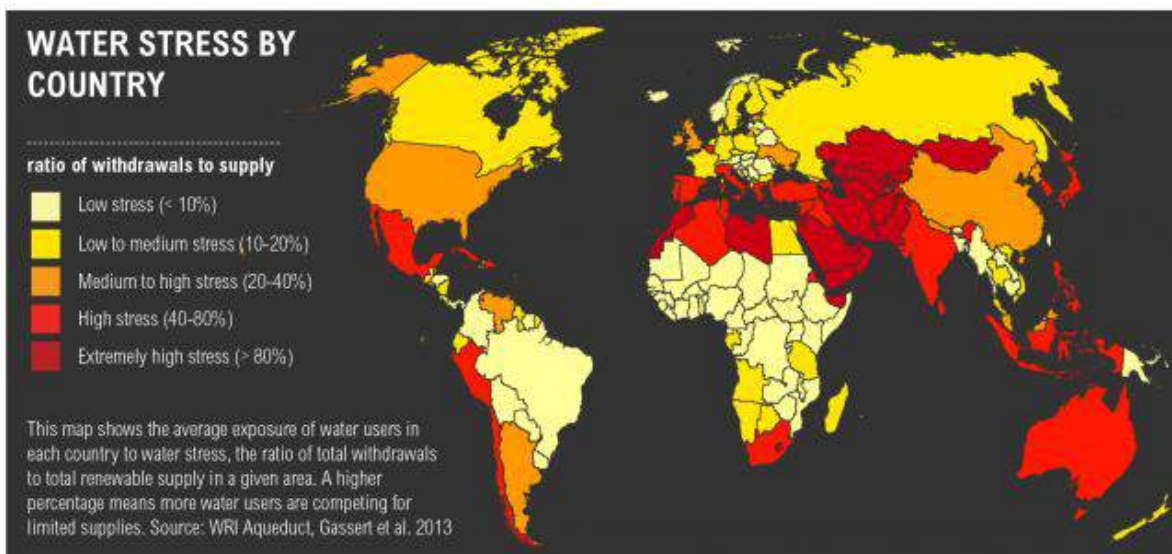


Figura 8 – Estrés hídrico por país<sup>14</sup>

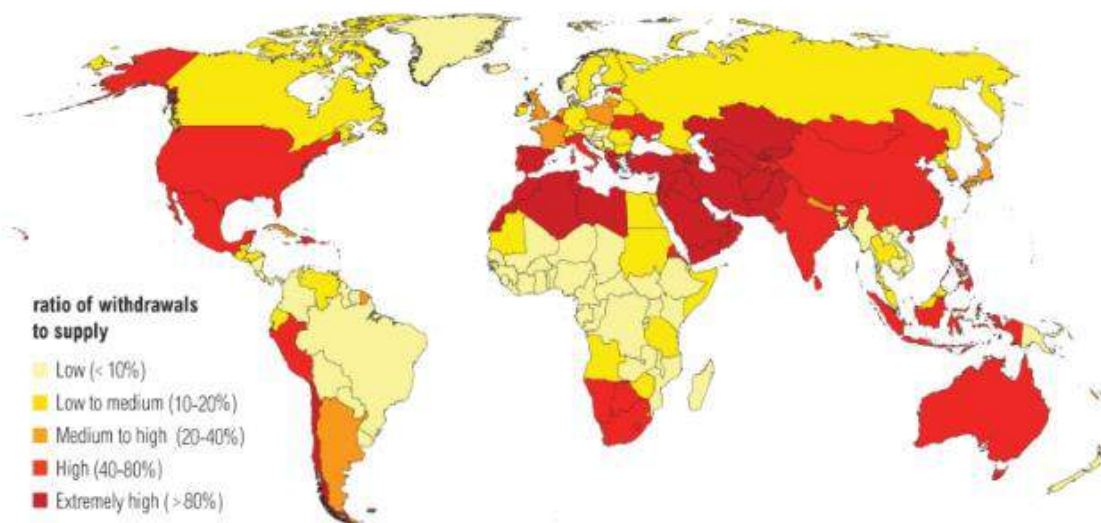


Figura 9 – Estrés Hídrico, por país, hacia el año 2040<sup>15</sup>

Ranking	Nombre
1	Bahréin
1	Kuwait
1	Qatar
1	San Marino
1	Singapur
1	Emiratos Árabes Unidos

<sup>14</sup> Ibidem.

<sup>15</sup> **World Resources Institute (2015)**. Aqueduct Projected *Water Stress Country Rankings*, Technical Note, Agosto de 2015. En: [http://www.wri.org/sites/default/files/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf\[82\]](http://www.wri.org/sites/default/files/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf[82]), p.5



1	Palestina
8	Israel
9	Arabia Saudita
10	Oman
11	Lebanon
12	Kyrgyzstan
13	Iran
14	Jordan
15	Libya
16	Yemen
17	Macedonia
18	Azerbaijan
19	Marruecos
20	Kazakhstan
21	Iraq
22	Armenia
23	Pakistan
24	Chile
25	Syria
26	Turkmenistan
27	Turquía
28	Grecia
29	Uzbekistan
30	Algeria
31	Afghanistan
32	España
33	Túnez

**Tabla 1 – Ranking de países con mayor estrés hídrico hacia el año 2040<sup>16</sup>**

En definitiva, sea por un estudio o por otro, queda evidenciado que la falta de agua es uno de los mayores problemas actuales del mundo. Reflejo de esto es el hecho de que en el año 2003 se conforme *UN-Water*, haya sido el encargado de coordinar los estudios realizados por todos los diferentes organismos de las Naciones Unidas con implicancia en el agua. No sorprende entonces que el Foro Económico Mundial (WEF por sus siglas en inglés) haya determinado en el año 2016 que la escasez de agua será el mayor riesgo para las personas y la economía en las próximas décadas.

### 2.3. Selección del país de estudio

Hasta aquí se ha presentado el problema y los países más afectados por el mismo, sin embargo, debido al alcance limitado al presente trabajo se seleccionará el país que presenta mejores condiciones para poder instalar una planta de desalinización alimentada por energía nuclear. A tal efecto se presenta una matriz de ponderación que, si bien en el ANEXO A se

<sup>16</sup> Ibidem.

desarrolla con mayor detalle, en este capítulo de describirán los criterios principales utilizados para la selección del país en cuestión.

### 2.3.1. Selección del país de estudio

En primera instancia, sobre la base de países presentados en la Tabla 1 se descartan aquellos países que no se consideran válidos para el presente estudio, siendo los criterios adoptados los siguientes:

- Aquellos países que no cuenten con salida al mar, recurso esencial para el proyecto planteado.
- Aquellos países que mediante leyes o decretos se han manifestado expresamente como países no nucleares
- Aquellas regiones que no constituyen un país, como es el caso de Palestina.

### 2.3.2. Criterios de evaluación

Los criterios que se utilizan para ponderar los países en estudio son:

- Estrés Hídrico

En base a la proyección de estrés hídrico realizado por la *World Resource Institute*, y presentado en la Tabla 1 se evalúa el ratio entre las extracciones de agua y el aporte de renovación de agua a la cuenca. Este factor se pondera con un 25%, pues a mayor problema de falta de agua, mayor necesidad de instalar nuevas plantas de desalinización.

- Riesgo Sísmico

Si bien no imposibilita su emplazamiento, el riesgo sísmico afecta directamente el diseño de cualquier reactor nuclear pues, a mayor aceleración sísmica, mayores son los esfuerzos para los que deben estar diseñados las estructuras, sistemas y componentes del reactor y, por lo tanto, resultan más costosos. Por lo tanto, este factor se pondera con una incidencia de 20%.

Para poder evaluar el riesgo que presenta cada uno de los países evaluados, se utiliza el mapa de riesgo sísmico, que se muestra en el ANEXO B. En el mismo se indica una escala de colores basados en la aceleración de campo libre, con una recurrencia de 475 años, con una probabilidad de ser superada del 10% en 50 años.

En países con zonas de diferente riesgo sísmico se ha considerado, para su evaluación, aquella correspondiente a la zona costera. En aquellos países que de todas formas presentan distintas categorías en zonas costeras, se ha adoptado la correspondiente al sector donde se encuentra la capital o ciudad más importante.

- Actividad Nuclear

La existencia de actividad nuclear en el país se evalúa debido a que la existencia de la misma garantiza el marco institucional y legal propicio para la instalación de un nuevo reactor nuclear. Se debe destacar que no contar con dicha estructura no imposibilita la instalación de una

central nueva, aunque demora los tiempos y trámites para poder construir uno. Por lo tanto, se pondera esta categoría con un 25%<sup>17</sup>.

- PBI del país

Tanto la desalinización de agua de mar como la industria nuclear son de capital intensivo, por tal motivo se evalúa el producto bruto interno de cada uno de los países, como una medida de la capacidad económica de los mismos para afrontar este tipo de obras. A pesar de que para proyectos de esta índole suele haber financiamiento de distintos organismos internacionales, de todas formas, se ha decidido considerarlo en la evaluación con una incidencia del 15%.

- Estabilidad política

La estabilidad política de un país es relevante a la hora de la elección del sitio óptimo para instalar el proyecto. Esta afirmación encuentra sustento no solo en el hecho de que afecta en la llegada o no de inversiones al país, sino en el hecho de que los reactores nucleares requieren condiciones de seguridad determinadas, que el accionar de grupos terroristas o la falta de un estado afirmado pueden poner en riesgo. Por lo anteriormente expuesto, se ha evaluado este ítem con una incidencia del 15%.

Para evaluar la estabilidad del país se ha utilizado el indicador denominado “*Political Stability and Absence of Violence/Terrorism*”, provisto por el *World Bank* en el año 2016. El mismo mide la percepción de que un gobierno sea desestabilizado o derrocado por medios inconstitucionales o violentos.<sup>18</sup>

### 2.3.3. Resultados obtenidos

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos por cada país, resultando el de mayor puntaje Emiratos Árabes Unidos. Por lo tanto, éste será el país sobre el que se desarrollará la presente tesis. En el Anexo A se puede encontrar mayor detalle respecto a los indicadores obtenidos en cada caso por cada país.

---

<sup>17</sup> **International Atomic Energy Agency (2017).** *Nuclear Power Reactors in the World*, Edición 2017, IAEA-RDS N°2, Viena, Austria., (ref.[37])

<sup>18</sup> The World Bank (ref. [73]). <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=worldwide-governance-indicators> (acceso el 10/08/2018)

Pais	Factor evaluado															TOTAL
	ranking de estrés			riesgo sísmico			Actividad Nuclear			Indicador económico			Estabilidad política			
	factor ponderacion	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	puntaje obtenido	parcial ponderado	
Bahrain	0,25	10	2,5	0,2	8	1,6	0,25	4	1	0,15	1,00	0,15	0,15	5	0,75	6
Qatar		10	2,5		8	1,6		4	1		2,00	0,3		9	1,35	6,75
Singapore		10	2,5		8	1,6		4	1		3,00	0,45		10	1,5	7,05
Saudi Arabia		9	2,25		8	1,6		4	1		6,00	0,9		6	0,9	6,65
Libano		9	2,25		4	0,8		4	1		1,00	0,15		4	0,6	4,8
Iran		9	2,25		2	0,4		10	2,5		4,00	0,6		5	0,75	6,5
Iraq		6	1,5		6	1,2		4	1		2,00	0,3		2	0,3	4,3
Pakistan		4	1		4	0,8		10	2,5		3,00	0,45		5	0,75	5,5
Syria		4	1		4	0,8		4	1		1,00	0,15		1	0,15	3,1
Turkey		2	0,5		2	0,4		4	1		7,00	1,05		3	0,45	3,4
United Arab Emirates		10	2,5		6	1,2		8	2		3,00	0,45		8	1,2	7,35
Israel		5	1,25		4	0,8		4	1		3,00	0,45		5	0,75	4,25
Oman		9	2,25		6	1,2		4	1		1,00	0,15		9	1,35	5,95
Yemen		7	1,75		8	1,6		4	1		1,00	0,15		1	0,15	4,65
Libia		8	2		8	1,6		4	1		1,00	0,15		2	0,3	5,05
Marruecos		8	2		6	1,2		4	1		1,00	0,15		6	0,9	5,25
Tunez		2	0,5		8	1,6		4	1		1,00	0,15		5	0,75	4
Argeria		2	0,5		6	1,2		4	1		2,00	0,3		5	0,75	3,75
Azerbaijan		6	1,5		2	0,4		4	1		1,00	0,15		5	0,75	3,8
Kazakhstan		6	1,5		8	1,6		6	1,5		1,00	0,15		7	1,05	5,8
Turkmenistan	3	0,75	4	0,8	4	1	1,00	0,15	6	0,9	3,6					
Spain	1	0,25	6	1,2	10	2,5	10,00	1,5	8	1,2	6,65					

Tabla 2 – Matriz de ponderación de sitio de ejecución del proyecto – elaboración propia

### 3 CARACTERIZACIÓN DE EMIRATOS ÁRABES UNIDOS

#### 3.1. Aspectos generales

##### 3.1.1. Geografía

Los Emiratos Árabes Unidos (EAU) se encuentran conformados por siete emiratos diferentes: Abu Dhabi, Dubai, Sharjah, Ajman, Fujairah, Umm Al Quwain Ras y Al Khaimah. Se puede apreciar en la Figura 10 la disposición de cada uno de ellos.

Se observa que Abu Dhabi es el que presenta mayor tamaño, ocupando tres cuartos de la superficie total del país. Adicionalmente, esta región, que contiene toda la frontera de los EAU con Arabia Saudita, presenta la mayor actividad en la industria del petróleo. Por otro lado, si bien Dubai cuenta con menor superficie y actividad industrial, representa el centro comercial del país.

En cuanto a sus fronteras, los EAU limitan al norte y este con Omán, al sur y oeste con Arabia Saudita y al noroeste con Qatar.

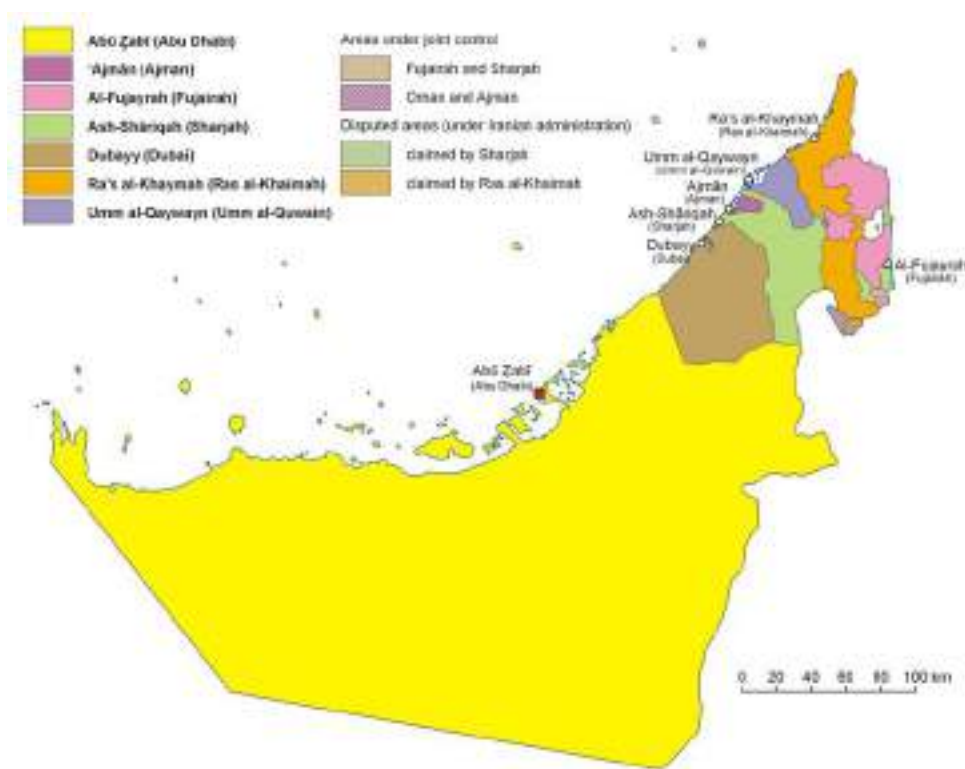


Figura 10 – Mapa de Emiratos Árabes Unidos (EAU)<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Enciclopedia Británica (ref. [65]). <https://www.britannica.com/place/United-Arab-Emirates/Land> (acceso el 10/09/2018)



Figura 11 – Disposición de los EAU en el Golfo Pérsico<sup>20</sup>

El paisaje, en más de un 80% es desértico, presentando grandes extensiones de dunas de arenas, con la presencia de algunos oasis relevantes, tales como el Al-‘Ayn. El terreno es mayoritariamente plano contando con la única elevación considerable en la frontera norte con Omán, con montañas que alcanzan los 2.000 m sobre el nivel del mar. Si bien la costa es extensa y presenta muchas islas, no hay puertos naturales de aguas profundas, siendo el de Dubai artificial.

El clima es caluroso y húmedo en las zonas costeras, y más caluroso aún, pero seco, en el interior de la península. La temperatura promedio en julio es de 33°C, aunque hay registros de hasta 49°C. Las lluvias son en general escasas, oscilando entre los 40 y 160 mm anuales, concentrándose mayoritariamente entre diciembre y marzo.<sup>21 22</sup>

### 3.1.2. Demografía

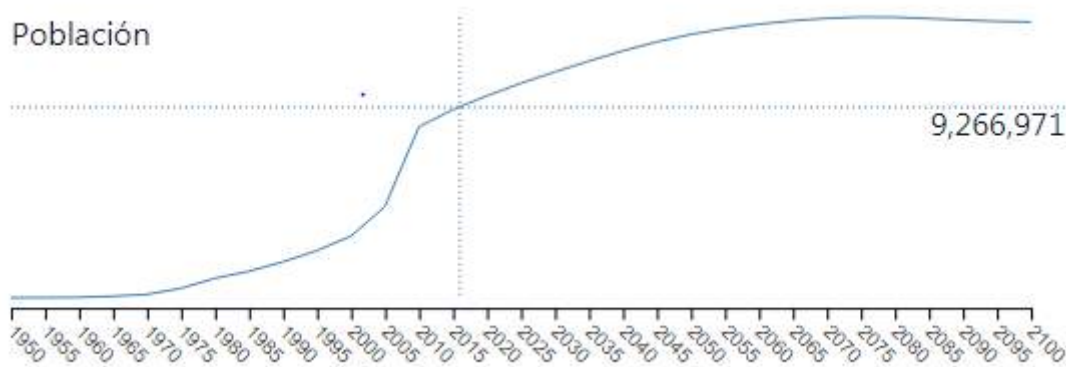
La población en el año 2018 de los EAU es de 9.522.121, con una densidad promedio de 114 habitantes/km<sup>2</sup>. En la Figura 12 se puede apreciar el crecimiento poblacional que ha iniciado en el año 1970, pero que ha aumentado su tasa de manera abrupta hacia el año 2000. Las proyecciones estiman que hacia el futuro la tasa de crecimiento poblacional disminuirá

<sup>20</sup> Ibidem.

<sup>21</sup> Ibidem.

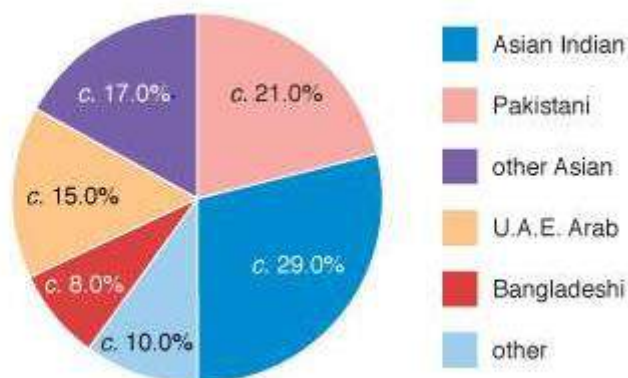
<sup>22</sup> AQUASTAT, FAO (ref. [63]). [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/ARE/ARE-CP\\_eng.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ARE/ARE-CP_eng.pdf) (acceso 11/09/2018)

considerablemente, logrando hacia el año 2070 tornarse asintótica, sin embargo, para ese entonces, se espera que la cantidad de habitantes se notoriamente superior a la actual, lo que generará un mayor consumo de recursos para el sustento de la población.<sup>23</sup>



**Figura 12 – Evolución curva demográfica EUA**

El crecimiento poblacional mencionado anteriormente se debe en gran medida a las inmigraciones que se dieron en el país. De hecho, se puede apreciar en la Figura 13 que solo el 15% de la población del país es autóctona. Este proceso migratorio tiene su origen en el crecimiento económico que se ha evidenciado en el país en las últimas décadas. Sin embargo, esta inmigración presenta una particularidad respecto a la de otros países prósperos ya que en su mayoría se trata de inmigrantes con visa de trabajo. Es decir, que se trata de personas en edad laboral, y en su mayoría hombres.<sup>24</sup>



**Figura 13 – Distribución étnica de EAU, en el año 2009<sup>25</sup>**

La población se concentra principalmente en Dubai, con 2.689.000 habitantes, Abu Dhabi con 1.252.000, Sharjah 1.400.00, todas estas ciudades localizadas sobre la costa noroeste, y Al Ain, sobre el este del país con 614.000, tal como se puede observar en la Figura 14.

<sup>23</sup> World Population Review (ref. [79]), [Http://worldpopulationreview.com/countries/united-arab-emirates-population](http://worldpopulationreview.com/countries/united-arab-emirates-population) (acceso 01/10/2018)

<sup>24</sup> *Ibidem.*

<sup>25</sup> Enciclopedia Británica, OP. Cit.

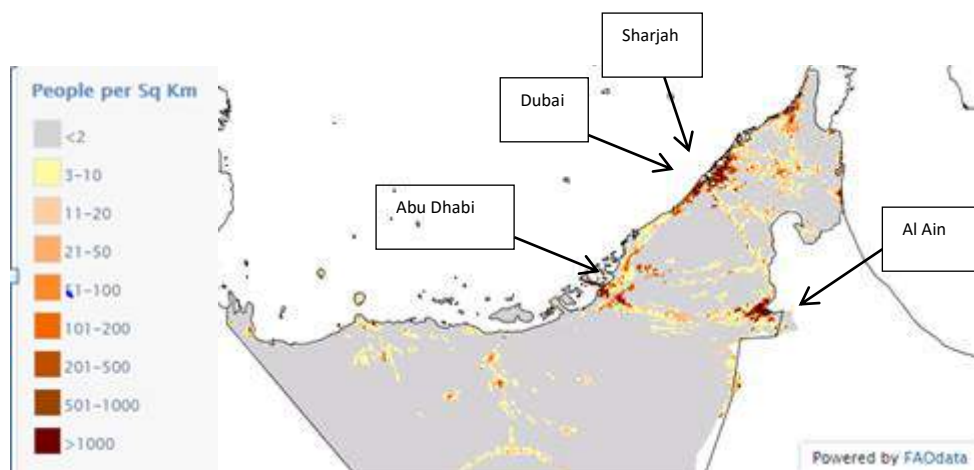


Figura 14 – Distribución de población dentro de EAU<sup>26</sup>

### 3.1.3. Riesgo Sísmico

En base a lo que se observa en el mapa presentado en el ANEXO B, los EAU presentan un riesgo sísmico variable, siendo moderado en la zona de Abu Dhabi y elevado en la de Dubai, tal como se puede observar en el extracto del mapa presentado en la Figura 15. Por otro lado, tal como se comentó en el capítulo 3.1.1, las aguas en la costa del país son poco profundas, por lo que el riesgo de tsunami es muy bajo.

Por lo tanto, al cruzar esta información con las ciudades que presentan mayor cantidad de habitantes, se desprende que Abu Dhabi es la ciudad con mejores características si se deseara instalar una planta desalinizadora de agua alimentada mediante energía nuclear. Esto se debe a que, dentro de los centros urbanos de mayor población, y por lo tanto donde la demanda de agua es mayor, es el que presenta menor riesgo sísmico. Por lo tanto, la instalación de una central nuclear tendrá menor costo que en las ciudades con mayor riesgo sísmico.

<sup>26</sup> AQUASTAT, FAO. Op. Cit.



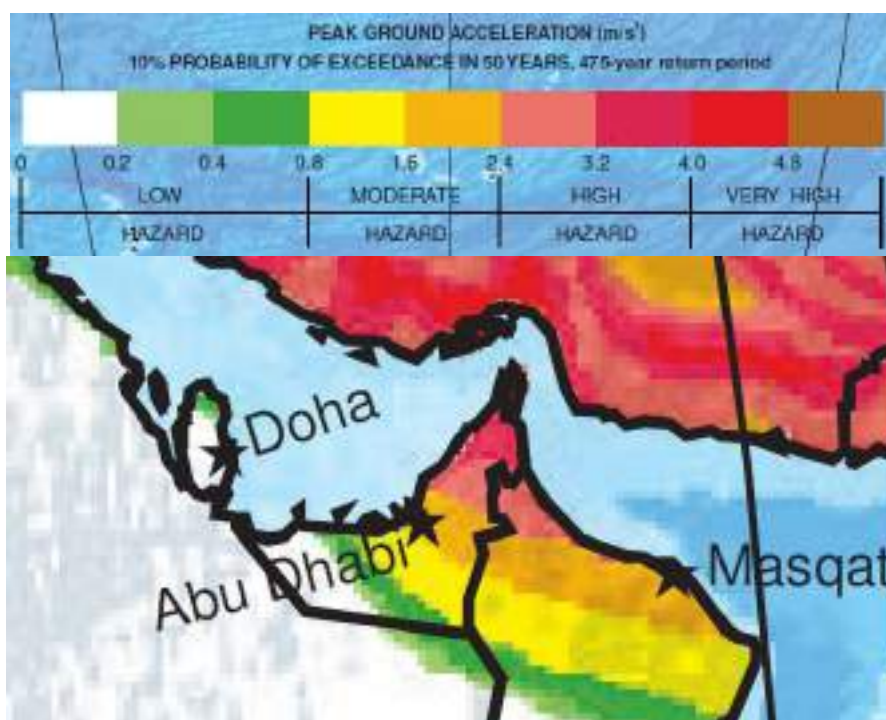


Figura 15 – Riesgo Sísmico en EAU <sup>27</sup>

### 3.1.4. Economía

#### 3.1.4.1. PBI

En la Figura 16 se puede apreciar el crecimiento exponencial que ha reflejado el PBI de los EAU a partir de la década del 80. El mismo está principalmente sustentado en la extracción de hidrocarburos, y ha permitido alcanzar el valor de 37.615 millones de U\$S considerados en el capítulo 2.3.1. Sin embargo, en los últimos años el gobierno ha tratado de aumentar la incidencia de otras actividades no vinculadas al petróleo y el gas. Esta variación se describirá en el capítulo siguiente. Hacia el futuro las distintas estimaciones prevén un crecimiento de entre 3 y 3.5 puntos hasta el año 2022. Este crecimiento proyectado es fundamental pues, por un lado, acompaña el crecimiento poblacional proyectado, mencionado el capítulo 3.1.2, y por el otro permite acompañar la instalación de proyectos de capital intensivos como lo son las centrales nucleares y las plantas desalinizadoras de agua.<sup>28</sup>

<sup>27</sup> Extracto de Mapa Sísmico presentado en ANEXO B.

<sup>28</sup> Trading Economics. (ref. [74]) <https://tradingeconomics.com/ united-arab-emirates/gdp> (acceso 01/08/2018)

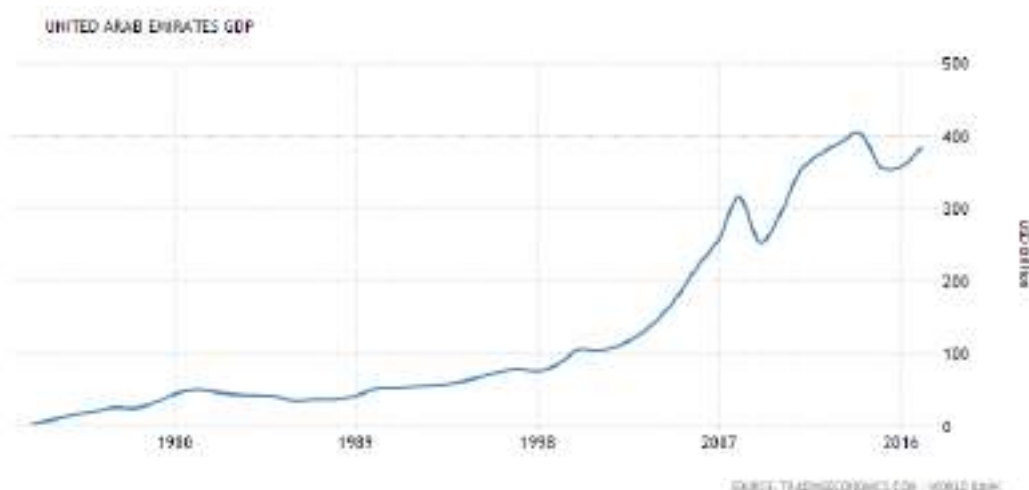


Figura 16 – Variación del PBI en EAU<sup>29</sup>

#### 3.1.4.2. Agricultura e industria

Si bien históricamente la extracción de hidrocarburos ha sido la principal actividad económica de la región, se puede observar en la Tabla 3 y Tabla 4 que la incidencia de la misma en el total del PBI ha descendido de aproximadamente el 40% hacia el año 2012, a poco más del 15% en 2016. Esto se debe principalmente a las limitaciones en la extracción que ha fijado la OPEC y las variaciones del precio de venta. Como consecuencia, otras actividades han ganado participación en el total del PBI de los últimos años, tales como la construcción, actividad financiera, etc..<sup>30</sup>

Respecto a la agricultura, si bien tiene una incidencia en la actividad económica de solo el 0,8% del PBI, se analiza en el presente trabajo debido a la demanda de agua que requiere. De acuerdo a la estimación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO por sus siglas en inglés, para el año 2014 apenas 382.300 Ha estaban destinadas a la agricultura, es decir el 4,57% de la superficie total del país<sup>31</sup>. Vale la pena destacar que casi la totalidad de las mismas se encuentran en Abu Dhabi. Debe resaltarse el esfuerzo que se ha venido efectuando en el país desde principios de la década de los 90 para incentivar el uso de métodos más eficientes en la agricultura, especialmente en los métodos de riego. Más específicamente, se están aplicando incentivos para evitar el riego por inundación de campos, debido principalmente a la problemática del agua que enfrentan, tal como será desarrollado en los capítulos siguientes.

<sup>29</sup> Fuente: World Bank (ref. [73])

<sup>30</sup> ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. (ref.[49]) pp. 25-55

<sup>31</sup> FAO. <http://www.fao.org/countryprofiles/index/es/?iso3=ARE> (acceso el 08/08/2018).

Sectors	2012	2013	*2014	*2015	*2016
Non Financial Projects Sector	88.7	87.3	86.2	83.4	82.6
Agriculture, Forestry and Fishing	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8
Extractive Industries (Including Crude Oil and Natural Gas)	39.1	37.0	34.2	21.9	16.7
Transformative Industries	7.7	7.6	7.8	9.0	9.5
Electricity, Gas and Water and Waste Management Activities	2.8	2.8	2.6	3.6	3.9
Construction and Building	8.2	8.1	8.3	9.7	10.3
Wholesale and Retail Trade; Repair of Motor Vehicles and Motorcycles	10.0	10.6	10.6	12.2	12.8
Transport and Storage	6.6	6.6	6.8	6.8	7.4
Accommodation and Food Services Activities	1.8	2.0	2.1	2.4	2.6
Information and Communications	2.3	2.3	2.6	2.8	3.0

**Tabla 3 – Incidencia en el PBI de las actividades de la economía desde el 2012 al 2016 - Parte 1<sup>32</sup>**

ar

Sectors	2012	2013	*2014	*2015	*2016
Financial and Insurance Activities	6.1	7.0	7.8	9.8	10.1
Real Estate Activities	4.7	4.6	5.0	6.0	6.9
Professional, Scientific and Technical Activities	3.8	3.4	3.4	3.1	3.3
Administrative and Support Services Activities	1.5	1.6	1.7	2.0	2.1
Public Administration and Defense; Compulsory Social Security	4.8	5.2	5.8	6.4	6.6
Education	1.0	1.0	1.0	1.2	1.3
Activities of Human Health and Social Service	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4
Arts, Entertainment, Recreation and Other Services Activities	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6
Household Activities as an Employer	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7
<b>Total</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
<b>Total Non Oil</b>	<b>68.9</b>	<b>63.0</b>	<b>65.8</b>	<b>79.1</b>	<b>83.3</b>

**Tabla 4 – Incidencia en el PBI de las actividades de la economía desde el 2012 al 2016 - Parte 2<sup>33</sup>**

<sup>32</sup> United Arab Ministry of Economy (2017). Op. Cit., p.30

### 3.1.5. Recursos hídricos

En primera instancia debe considerarse que cuando se habla de recursos hídricos se hace referencia al agua dulce. Los mismos se dividen en convencionales, que pueden ser superficiales, es decir ríos o lagos, o subterráneos, pudiendo ser acuíferos confinados o libres, o no convencionales como la desalinización o reutilización de aguas residuales.<sup>34</sup>

En la Figura 17 se aprecia un esquema con la disposición típica de los acuíferos confinados, o cautivos en la imagen, y libres.

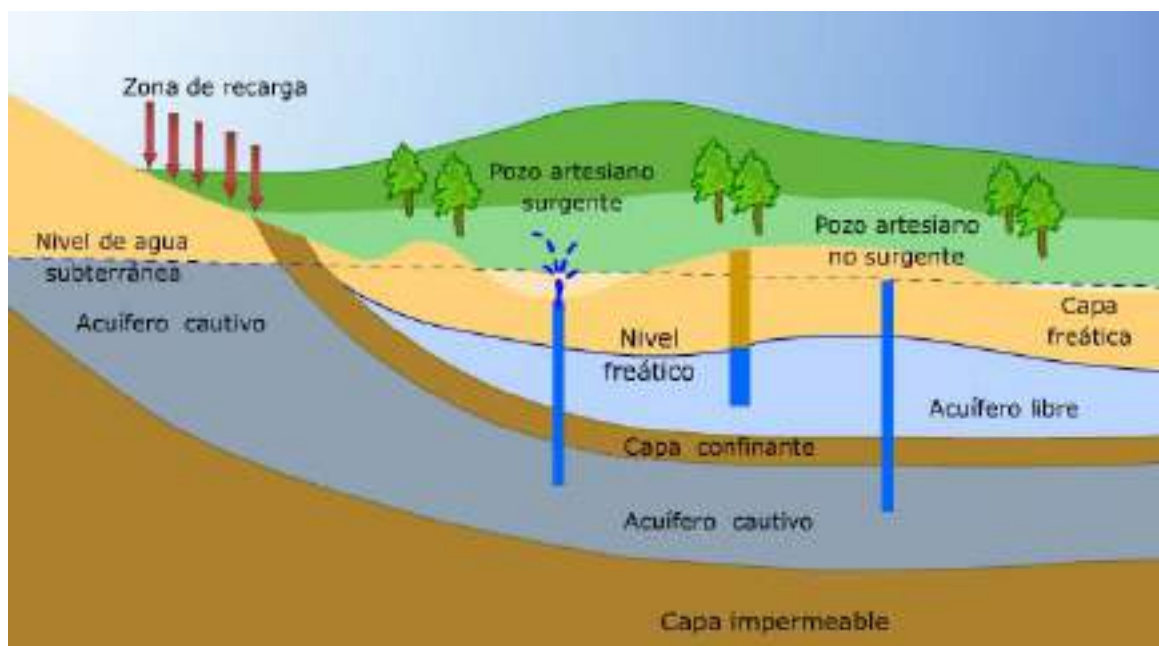


Figura 17 – Tipos de acuíferos <sup>35</sup>

En el caso de los EAU es prácticamente nula la presencia de fuentes de agua superficiales permanentes. Es decir que los ríos existentes solo se cargan de agua durante la época de lluvias. Por lo tanto, la gran mayoría de los 150 millones de m<sup>3</sup> de agua que reingresan a la cuenca hídrica del país se encuentra disponible en acuíferos subterráneos (ver Tabla 5).

Las aguas subterráneas confinadas, por otro lado, representan la mayor reserva de agua del país, sin embargo, tan solo el 3% de los 640.000 millones de m<sup>3</sup> representan agua dulce.

Se presentan dos sistemas de acuíferos. El más aprovechable se forma en el este del país, en la región de Bajada, en la base de las montañas que limitan la frontera con Omán. Presenta un espesor variable entre los 200 y 800 metros y las características del agua varía entre los 200 y 600 ppm de Sólidos Totales Disueltos (STD). Por otro lado, en el oeste del país, se encuentra el sistema formado por los acuíferos de Dammam y Umh er Radhuma, pero en este caso el contenido de sales es muy elevado.

Para poder elevar el aprovechamiento de los acuíferos poco profundos se han construido más de 114 represas con una capacidad de almacenamiento de 118 millones de m<sup>3</sup>. Sin embargo,

<sup>33</sup> Ibidem, p.31

<sup>34</sup> AQUASTAT, FAO. Op. Cit.

<sup>35</sup> Fuente: [https://redprotejo.files.wordpress.com/2014/10/ap12\\_acuiferos.jpg](https://redprotejo.files.wordpress.com/2014/10/ap12_acuiferos.jpg) (acceso 15/06/2018)

y a pesar de la elevada capacidad de almacenamiento total que proveen, el almacenamiento real logrado oscila alrededor del 10%, presentando una gran evaporación superficial.

Water: sources and use			
<b>Renewable freshwater resources</b>			
Precipitation (long-term average)	-	78	mm/yr
	-	6.521	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Internal renewable water resources (long-term average)	-	0.15	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Total actual renewable water resources	-	0.15	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Dependency ratio	-	0	%
Total actual renewable water resources per inhabitant	2005	48.29	m <sup>3</sup> /yr
Total dam capacity	2006	118	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<b>Water withdrawal</b>			
Total water withdrawal	2005	3 998	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
- irrigation + livestock	2005	3 312	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
- municipalities	2005	617	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
- industry	2005	69	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
• per inhabitant	2005	889.2	m <sup>3</sup> /yr
Surface water and groundwater withdrawal	2005	2 800	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
• as % of total actual renewable water resources	2005	1 867	%
<b>Non-conventional sources of water</b>			
Produced wastewater	1995	500	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Treated wastewater	2006	289	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Reused treated wastewater	2005	248	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Desalinated water produced	2005	950	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr
Reused agricultural drainage water	-	-	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr

Tabla 5 – Recursos naturales y uso<sup>36</sup>

Respecto a las fuentes no convencionales, se destaca en el país la utilización de la desalinización de agua siendo, después de Araba Saudita, el mayor productor mundial. Desde 1977, año en que se instaló la primera planta desalinizadora en Abu Dhabi, el volumen de agua suministrado por esta vía creció exponencialmente, llegando en el año 2005 a 950 millones de m<sup>3</sup>, y contando con más de 33 plantas de desalinización industrial en el año 2015. En la Figura 18 se puede apreciar que la ubicación de las plantas desalinizadoras se concentra en torno a las ciudades de Abu Dhabi, Dubai y Ajman, es decir en las zonas más densamente pobladas, tal como se desarrolló en el capítulo 3.1.2. Con perspectivas hacia el futuro, considerando el aumento demográfico proyectado y que no se espera que la cantidad de agua disponible en la cuenca aumente significativamente, la desalinización de agua se posiciona como la fuente de abastecimiento principal. Adicionalmente se ha implementado un sistema reutilización de aguas residuales, llegando a reutilizar aproximadamente la mitad del fluido residual generado.<sup>37</sup>

La desalinización es la principal solución para contrarrestar los problemas de falta de agua. Sin embargo, debe considerarse la incidencia que tiene esta actividad tiene en las características de las aguas, producto de la restitución al mar de las sales tratadas. Si bien no es el objeto del presente capítulo, basta con decir que de las 37.000 ppm de STD históricos de las aguas del golfo, producto de la descarga de las más de 199 plantas desalinizadoras instaladas en la costa del Golfo Pérsico<sup>38</sup>, se ha escalado a valores entre 42.000 y 56.000 ppm, es decir, un 55% más que la

<sup>36</sup> AQUASTAT, FAO. Op. Cit.

<sup>37</sup> Water Fanack (ref.[77]), <https://water.fanack.com/uae/water-resources/> (acceso 29/05/2018).

<sup>38</sup> The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC) General Secretariat (2014). *Desalination in the GCC. The history, the present & the future*, Riad, Arabia Saudita.(ref. [48]), p.20 **Africa Climate Change, Energy and Security (ACCES) Dialogue Process (2010)**. *Climate Change and Security in Africa*, Bruselas, Bélgica.



salinidad del resto de los mares. De esta forma, el tratamiento del agua mediante esta vía se torna más costoso, pues demanda mayores cantidades de energía para el tratamiento.<sup>39</sup>



Figura 18 – Distribución de plantas desalinizadoras en EAU<sup>40</sup>

### 3.1.6. Uso del agua

En base a los reportes emitidos por el Ministerio de Ambiente y Agua de los EAU, hacia el año 2015 la fuente de provisión del agua era prácticamente equitativa entre el agua subterránea y la desalinizada, con más del 40% cada una. Si bien el porcentaje de incidencia en el total es bajo, se destaca el 14% del total del agua utilizada que se obtiene del tratamiento de aguas usadas.

En cuanto a la fuente de demanda se destaca que, si bien la agricultura representa menos del 1% del PBI, tal como se desarrolló en la sección 3.1.4.2, consume más del 60% del total de agua. Sin embargo, se espera que el consumo de esta actividad económica disminuya en el futuro debido a las mejoras tecnológicas que se están empleando. Adicionalmente, en la Figura 19 se aprecia que la incidencia de la industria es considerablemente menor que el consumo domiciliario y agropecuario.<sup>41</sup>

<sup>39</sup> **Mattew, F. (2016).** For UAE, *hope in Deep wáter desalination*, nota publicada en Gulf News el 28 de Septiembre de 2016.[44]).

<sup>40</sup> Fuente: AQUASTAT

<sup>41</sup> Water Fanack. Op. Cit. (<https://water.fanack.com/uae/water-use/>) (acceso el 29/5/18)

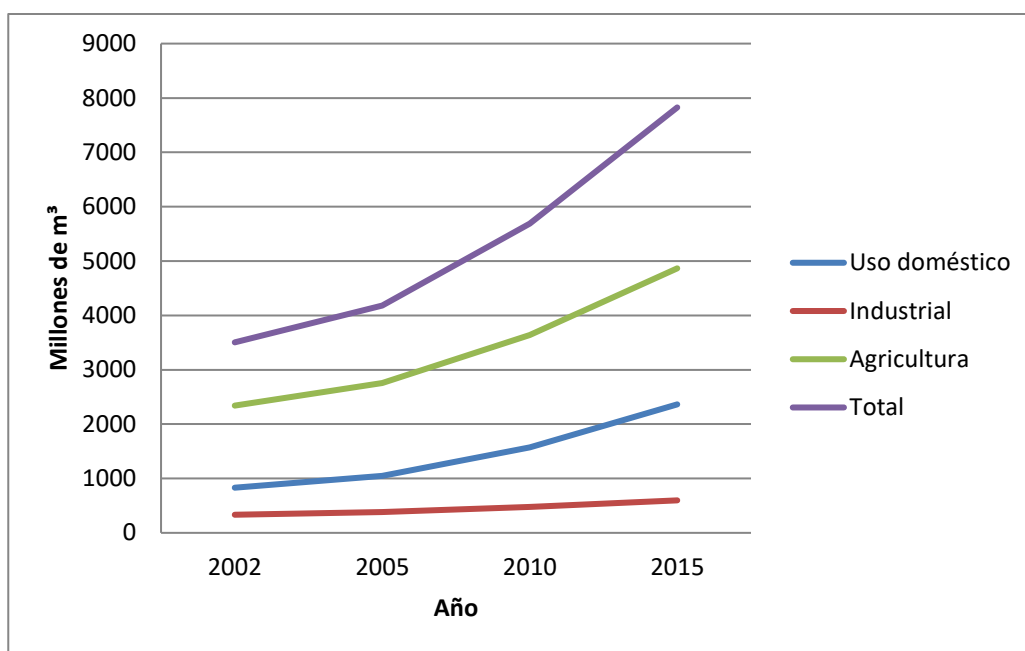


Figura 19 – Consumo de agua en EAU por actividad, por año<sup>42</sup>

### 3.2. Situación energética

#### 3.2.1. Recursos energéticos

Los EAU cuentan con una de las mayores reservas probadas de petróleo y gas del mundo, las sextas y quintas respectivamente, lo que se traduce en 1018,79 millones de barriles de petróleo y 54.630 millones de m<sup>3</sup> de gas producidos en el año 2013<sup>43</sup>. Resulta, sin embargo, llamativo el hecho de que sea un país importador de gas, recibiendo 13.334 millones de m<sup>3</sup> por año, es decir un 24% de su producción anual. El motivo del fenómeno anteriormente descrito radica en que las características de las reservas naturales de gas las vuelven económica y técnicamente desafiantes para su extracción, sumado a una dependencia elevada por dicho recurso.

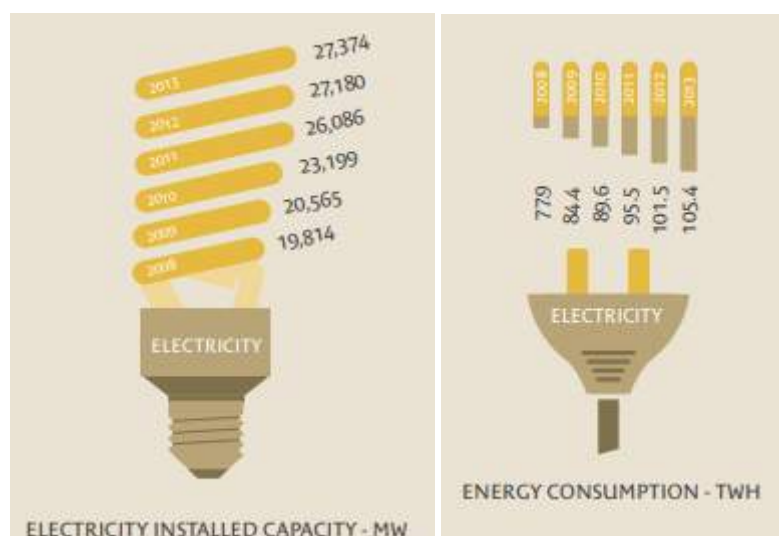
Lo mencionado anteriormente representa un problema en un país donde más del 90% de la generación eléctrica depende de la combustión de gas y, más aún, en un contexto donde el consumo de electricidad ha sufrido un aumento proporcionalmente similar al aumento del PBI, y es el principal sustento de las plantas de desalinización que proveen el agua de uso domiciliario (ver Figura 20).

Por lo tanto, y sumado al aumento de la conciencia del impacto de los hidrocarburos en el cambio climático, el gobierno planea diversificar la matriz energética del país con metas fijadas hacia el año 2021 y 2050. En una primera etapa, se espera que la incidencia de las energías limpias, compuestas por las renovables y la nuclear, alcance un 27% hacia el 2021, llegando luego a 50% (44% en renovables y 6% en nuclear). Adicionalmente, para este último año se espera disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 70% y aumentar la eficiencia energética un 40%.<sup>44</sup>

<sup>42</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>43</sup> United Arab Ministry of Energy (2016). UAE State of Energy Report 2016, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moei.gov.ae\(ref.\[51\]\)](http://www.moei.gov.ae(ref.[51])), p.11

<sup>44</sup> United Arab Ministry of Energy (2017). UAE State of Energy Report 2017, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moei.gov.ae\(ref.\[52\]\)](http://www.moei.gov.ae(ref.[52])), pp. 21-45.



**Figura 20 – Capacidad de generación instalada y consumo de electricidad en los EAU, año 2016<sup>45</sup>**

En la Figura 20 se puede observar tanto el aumento de la capacidad de generación de electricidad instalada como de consumo de electricidad en el país. Como se mencionó anteriormente, prácticamente la totalidad de la electricidad generada proviene de fuentes fósiles. De hecho, a pesar de las metas previamente mencionadas, para el año 2016 la capacidad de generación de electricidad mediante energía solar era, solamente, 300 MWe.

### 3.2.2. Plan nuclear

Como se ha mencionado anteriormente, se espera que para el año 2050 la incidencia de la energía nuclear en la matriz energética del país sea del 6%. Estas proyecciones tienen su origen en el plan nuclear lanzado en el año 2008 que postula la necesidad de inyectar energía de base limpia, económicamente competitiva y no fósil, a la red mediante la construcción de cuatro reactores nucleares. Los mismos están siendo construidos en la ciudad de Barakah por KEPCO, *Korea Electric Power Co.*, de forma prácticamente paralela, y se trata de unidades APR1400, tipo PWR, de 1.400 MWe cada una. Se destaca que la ciudad de Barakah presenta uno de los menores riesgos sísmicos de todo el país, tal como se puede apreciar en la Figura 15. Más precisamente, ambas centrales están diseñadas para un sismo severo con una aceleración de campo libre (PGA<sup>46</sup>) de 0,3g, es decir 2,94 m/s<sup>2</sup>. Si bien este valor es mayor que el representado en la Figura 15, debe considerarse que el período de recurrencia adoptado es de 10.000 años, a diferencia de los casi 500 años de la mencionada figura.<sup>47,48</sup>

<sup>45</sup> United Arab Ministry of Energy (2016), Op. Cit., p.30

<sup>46</sup> PGA proviene de las siglas en inglés de Peak Ground Acceleration

<sup>47</sup> World Nuclear Association (ref.[78]), <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/United-arab-emirates.aspx> (acceso el 15/09/2018)

<sup>48</sup>

Travers, W. (2012). *A newcomer's regulatory response to the Fukushima accident. Presentación realizada en Fukushima Ministerial Conference on Nuclear Safety, Federal Authority for Nuclear Regulation, 15-17 Diciembre de 2012, Emiratos Árabes Unidos.*(ref. [48])





Figura 21 – Ubicación de Barakah<sup>49</sup>

Se espera que durante el transcurso del año 2018 la primera de ellas entre en operación, haciendo lo mismo las restantes entre dicho año y 2022<sup>50</sup>.

La existencia de este plan sostiene la factibilidad de pensar en la desalinización nuclear pues, si bien un proyecto de este tipo no tiene exactamente la finalidad de introducir energía a la red, la presencia de instituciones, entes reguladores como la Autoridad Federal para la Regulación Nuclear (FARN<sup>51</sup>), proveedores y otros actores ya consolidados en el sector nuclear, sumado a una opinión pública positiva hacia esta energía, son hechos que resultan alentadores a la hora de pensar en el mismo.

<sup>49</sup> Fuente: Elaboración propia.

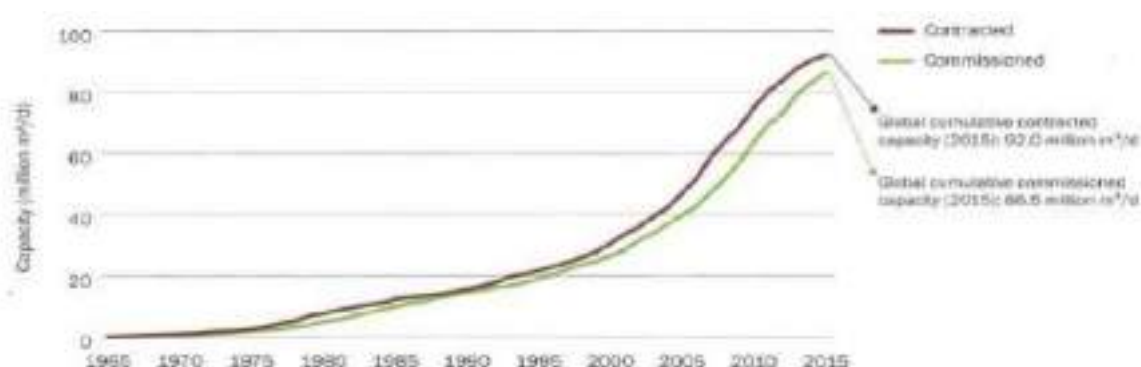
<sup>50</sup> IAEA (ref. [69]). <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/UnitedArabEmirates/UnitedArabEmirates.htm>

<sup>51</sup> FARN proviene de las siglas en inglés de Federal Authority for Nuclear Regulation.

## 4 DESALINIZACIÓN DE AGUA

### 4.1. Introducción

En los capítulos desarrollados previamente, en reiteradas ocasiones se ha mencionado la desalinización del agua, sin ahondar demasiado en el concepto. Como su nombre lo indica, la desalinización refiere al proceso de remover cierta cantidad de sales y minerales del agua salada o salobre<sup>52</sup>. Esta tecnología ha comenzado a utilizarse en el mundo a partir del año 1950 en aquellas regiones con estrés hídrico tales como California y el Golfo Pérsico. Desde aquel entonces, se han desarrollado diversas tecnologías que han permitido aumentar el rendimiento hasta llegar a las plantas industriales que se encuentran en operación hoy en día. En la Figura 22, se puede observar el crecimiento exponencial de la capacidad instalada a nivel mundial de las plantas de desalinización de agua.



**Figura 22 – Evolución de la capacidad instalada (comisionada y con contrato firmada) de desalinización de agua, a nivel mundial, hasta el año 2015<sup>53</sup>**

Hacia mediados del año 2015 se encontraban en operación aproximadamente 18.426 plantas desalinizadoras de agua, distribuidas en 150 países, con una capacidad de producción de aproximadamente 100 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce por día<sup>54</sup>. En la Figura 23 se puede apreciar cómo prácticamente un tercio de la capacidad instalada a nivel mundial se encuentra en plantas localizadas en Arabia Saudita (KSA por sus siglas en inglés), mayor productor del mundo, los EAU y los Estados Unidos, y cómo esa tendencia se mantiene durante el correr de los años. Por otro lado, aproximadamente el 45% de la producción de agua desalinizada del mundo se produce en el Golfo Pérsico.<sup>55</sup>

<sup>52</sup> Se considera agua salobre la que tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Técnicamente el agua salobre tiene entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro de agua.

<sup>53</sup> International Desalination Association (2015). *Desalination Water Report 2015*(ref. [39])

<sup>54</sup> IDA (ref. [70]), <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/> (acceso el 27/06/2018)

<sup>55</sup> Masdar (2017). *Renewable energy water desalination programme, the new frontier of sustainable water desalination*. Octubre de 2017. En <https://masdar.ae/>(ref.[43]), p.12

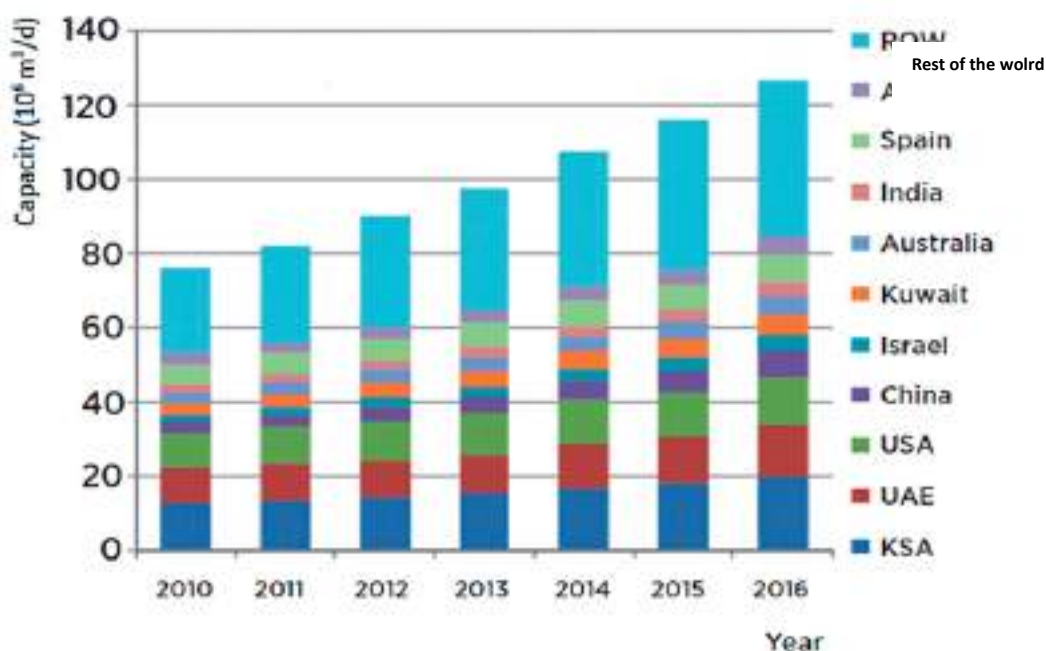


Figura 23 – Capacidad de desalinización global por país entre el año 2010 y 2016<sup>56</sup>

Si bien los distintos tipos de tecnologías disponibles se desarrollarán a continuación, en la Figura 24 se muestra la distribución porcentual, al año 2012, de uso de cada tecnología. Se observa cómo la mayor parte de la capacidad instalada corresponde a la utilización de Ósmosis Inversa (RO por sus siglas en inglés), mientras que la Destilación Flash Multietapa (MSF) y Destilación Multi Efecto (MED) son los otros métodos principales. Curiosamente, y como ejemplo de la velocidad con la que ha cambiado la industria de la desalinización en los últimos años, hacia el año 1999, el 78% del mercado era abarcado por el método MSF, y la incidencia del método RO era prácticamente nula. A lo largo del presente capítulo, el estudio de las características de cada uno de los métodos permitirá entender las razones para esta tendencia.

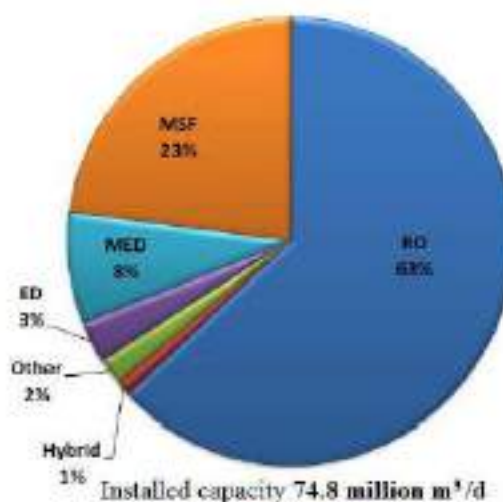


Figura 24 – Capacidad de desalinización global por tecnología (año 2012)<sup>57</sup>

<sup>56</sup> Agua: <https://www.iaqua.es/blogs/facts-and-figures/imparable-crecimiento-desalinizacion-lo-largo-mundo/> (acceso 14/07/2018)

Sin embargo, si se observa la incidencia de cada tecnología de forma localizada en el Golfo Pérsico, se observa que el MSF presenta un claro dominio del mercado, tal como se puede apreciar en la Figura 25. Esto se debe a la optimización de este método al trabajar acoplado a una planta térmica, y como es una región con abundancia de hidrocarburos, la generación energética se realiza mayoritariamente por esta fuente. De hecho, particularmente para el caso de los EAU, se ha desarrollado en el capítulo 3.2.1 que más del 90% de la generación energética se realiza por combustión de gas.

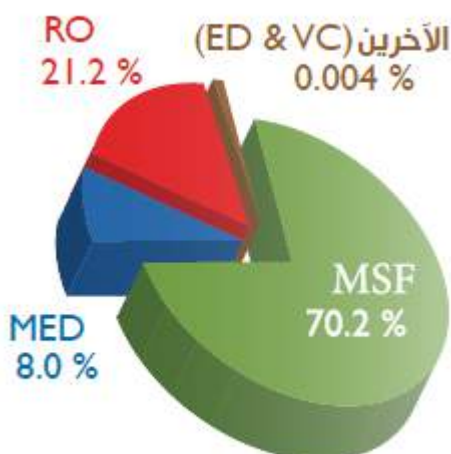


Figura 25 – Porcentaje de incidencia de cada tecnología en la capacidad de desalinización del Golfo Pérsico (año 2012)<sup>58</sup>

#### 4.2. Tecnologías existentes<sup>59</sup>

Los tipos de tecnologías existentes para la desalinización de agua pueden clasificarse en dos grandes grupos: los procesos térmicos, donde el agua de alimentación es destilada, condensando luego el vapor como agua pura, o los procesos de membrana, donde se utilizan membranas semipermeables para filtrar los sólidos disueltos. Cada uno de estos grupos tiene distintas tecnologías, tal como se puede apreciar en la Figura 26. En el presente capítulo se describirán los principios de funcionamiento de los principales métodos.

<sup>57</sup> International Atomic Energy Agency (2015). *New Technologies for Seawater Desalination using Nuclear Energy*, IAEA-TECDOC 1753, Viena, Austria.(ref.[34]), p.1

<sup>58</sup> The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC) General Secretariat (2014). *Desalination in the GCC. The history, the present & the future*, Riad, Arabia Saudita. Op. Cit., p.21

<sup>59</sup> Fuente general para todo el capítulo 4.2, a menos que se indique específicamente otra cosa: International Atomic Energy Agency (2015). *New Technologies for Seawater Desalination using Nuclear Energy*, IAEA-TECDOC 1753, Viena, Austria.(ref.[34]), Op. Cit., pp.5-15



Figura 26 – Tecnologías de desalinización de agua

#### 4.2.1. Procesos de desalinización térmica

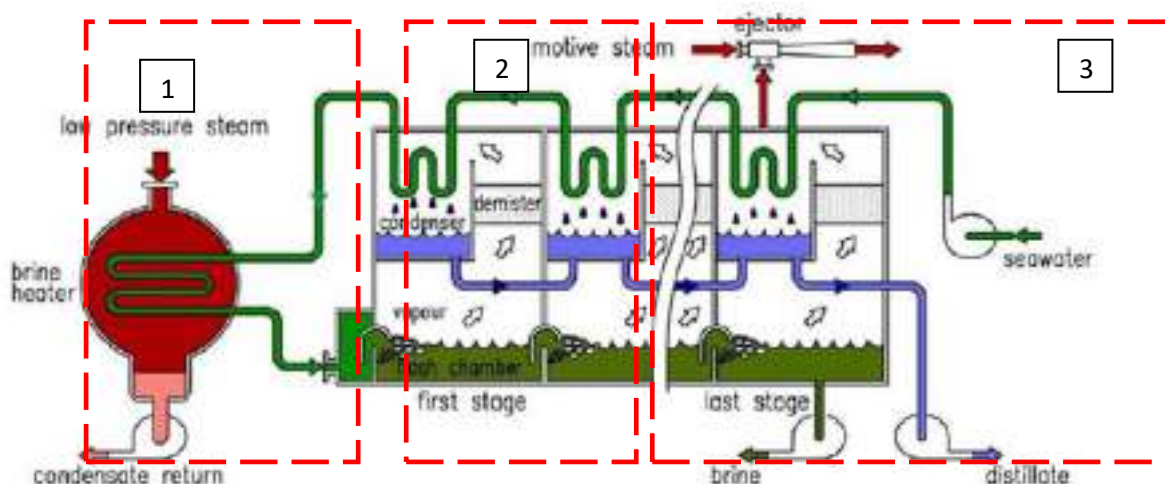
En la presente sección se describen los principios básicos de funcionamiento de los métodos MSF, MED, TVC y MVC. Los restantes métodos térmicos mencionados en la Figura 26 son tecnologías experimentales, que aún no se desarrollan a escala industrial.

En líneas generales se puede decir que este tipo de procesos consume cantidades de energía superiores al método RO. Aproximadamente, en el equivalente eléctrico, consumen entre 10 y 15 kWh/m<sup>3</sup> contra los 5 kWh/m<sup>3</sup> del RO. Sin embargo, la mayor cantidad de años de experiencia, así como la confiabilidad del proceso y la capacidad de producción a grandes escalas (hasta 75.000 m<sup>3</sup>/día, para el MSF), los transforman en métodos competitivos.

##### 4.2.1.1. Desalinización Flash Multietapa (MSF)

Conceptualmente el método consiste en calentar el agua salada que ingresa al proceso entre 90 y 110°C, (ver N° 1 en Figura 27). para luego hacerla circular hacia una primera etapa, donde se disminuye la presión por debajo de su presión de vapor de saturación equilibrio. De esta forma, el agua precalentada entra en ebullición de forma espontánea<sup>60</sup>, proceso denominado *flashing* en inglés (ver N° 2 en Figura 27).

<sup>60</sup> Este fenómeno está regido por la Ley General de los Gases, que vincula la presión, temperatura y volumen con una constante.



**Figura 27 – Esquema de desalinización mediante MSF**

El vapor generado de esta forma condensa sobre la cañería por la que ingresa el agua de mar al proceso, que atraviesa la cámara. El condensado, que aún permanece caliente, es recolectado y enviado a la siguiente etapa, donde la presión es aún menor que en la anterior. De esta forma, se vuelve a producir una evaporación espontánea, con su correspondiente condensación. Este proceso se repite en sucesivas etapas, obteniéndose en la última el agua desalinizada.

En cada una de las etapas, el vapor generado atraviesa *demisters* que eliminan las gotas de salmuera que arrastra. Posteriormente, se transforma en agua pura mediante la condensación en tubos fríos que recorren cada una de las mismas. A los efectos de ahorrar energía, los mencionados tubos se enfrían con el agua salada a tratar que alimentan al proceso. Adicionalmente, en este proceso se precalienta el agua de alimentación, por lo que la energía necesaria para calentar el líquido al inicio del proceso disminuye<sup>61</sup>. (ver N° 3 en Figura 28).

A modo de ejemplo, y para facilitar el entendimiento del proceso de destilación, se muestra a continuación un esquema de un tanque de destilación simple, o monocomponente (ver Figura 28). En la misma se observa que el líquido ingresa por un difusor (ver N° 2 en Figura 28), ante la menor presión existente en el tanque se divide el líquido en 2 fases, la gaseosa que se extrae por la parte superior, previo paso por el demister para retener partículas de agua disueltas (ver N° 1 en Figura 28), y el líquido condensado, que se remueve por la parte inferior (ver N° 3 en Figura 28).

<sup>61</sup> Ramilo, L., Gómez de Soler, S. y Coppari N. (2003). *Tecnologías de proceso para desalinización de aguas*. Revista de la CNEA, N° 3, Abril de 2003, 22-27.(ref.[46])



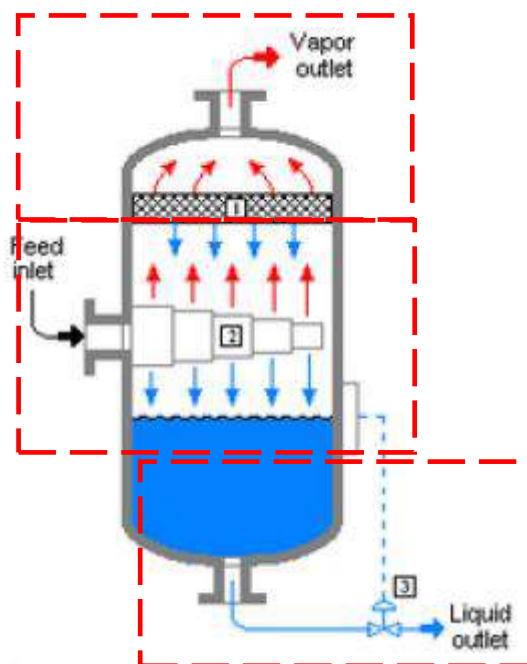


Figura 28 – Esquema de desalinización simple

Lo anteriormente descrito, al ser normalmente un proceso adiabático, responde a una ecuación de balance de energía que se realiza en la válvula de entrada, que permite estimar cuánto líquido del que ingresa será vaporizado.

$$X = \frac{H_u^L - H_d^L}{H_d^V - H_d^L}$$

#### Ecuación 1 – Fracción vaporizada del líquido de ingreso - Balance de energía

Donde:

- X: es la fracción vaporizada (adimensional)
- $H_u^L$ : es la entalpía de líquido saturado a presión y temperatura, en J/Kg
- $H_d^V$ : es la entalpía del vapor a su temperatura y presión de saturación, en J/Kg
- $H_d^L$  es la entalpía del líquido residual a su temperatura y presión de saturación, en J/Kg

El porcentaje de recuperación del agua producida depende tanto de la calidad del agua de mar que alimenta el proceso como de la temperatura inicial de calentamiento de la misma. La recuperación máxima esperada es entre el 12 y 20%.<sup>62</sup> Respecto a la configuración de la planta, la misma puede ser del tipo *once-through*, es decir que el agua recorre las etapas una sola vez, o del tipo de recirculación de salmuera.

Debido a la temperatura a la que se realiza el proceso, el riesgo de corrosión es elevado. Por tal motivo, debe realizarse pretratamiento del agua de ingreso con productos químicos, generalmente con cal. De la misma forma, la temperatura aumenta el riesgo de incrustaciones, motivo por el que se adiciona un aditivo o ácido al inicio del proceso.

<sup>62</sup> *Ibidem*.

Las plantas de MSF pueden diseñarse para un *Gain Output Ratio* (GOR) de hasta 11, contando con 40 etapas. Sin embargo, debido a que mayor GOR implica mayor cantidad de etapas y área de transferencia de calor, a mayor GOR, mayores serán los costos de construcción de la planta. Por lo general una planta de MSF tiene un GOR entre 7 y 9, requiriendo aproximadamente 28 etapas. Se destaca que este tipo de plantas suelen estar acopladas a una central térmica de generación eléctrica a los efectos de aprovechar el calor de vapor residual del proceso de generación de energía. En la Figura 29 se puede apreciar como el vapor obtenido mediante una caldera de recuperación a la salida de una central de ciclo abierto convencional puede ser utilizado tanto para un proceso industrial como para la generación de más energía eléctrica. En el caso de las plantas MSF, mencionado anteriormente, es este vapor el que se utiliza en el precalentamiento del proceso. Adicionalmente, se destaca que con este tipo de procesos el agua final tratada contiene menos de 10 ppm de Sólidos Totales Disueltos.

Finalmente, y tal como se introdujo en 4.1, debe mencionarse que esta tecnología que dominaba el mercado de desalinización anteriormente, es cada vez menos elegida en nuevos proyectos frente a los otros tipos de desalinización. Este se debe a que tanto MED como RO, así como las plantas híbridas, que se estudiarán más adelante, presentan mejores relaciones de rendimiento y costos, así como tecnologías más modernas. De hecho, los principales proveedores de equipamiento para desalinización prácticamente no venden productos nuevos de MSF, sino que concentran su mercado en las otras tecnologías mencionadas.

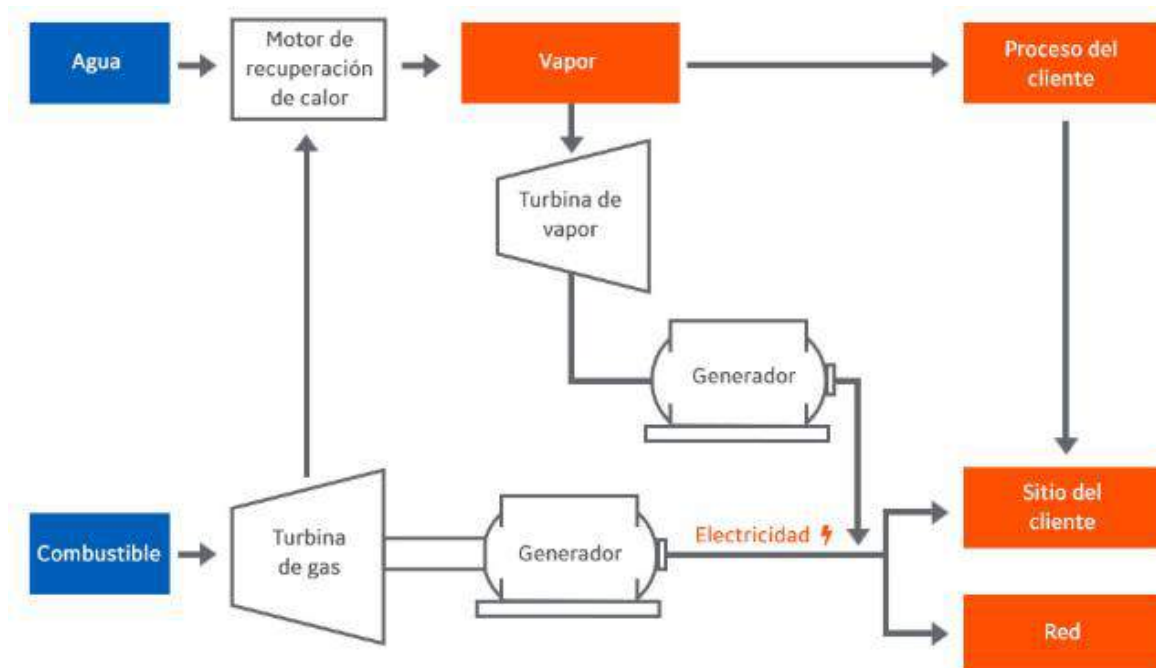


Figura 29 – Esquema de cogeneración industrial en una central térmica de ciclo combinado<sup>63</sup>

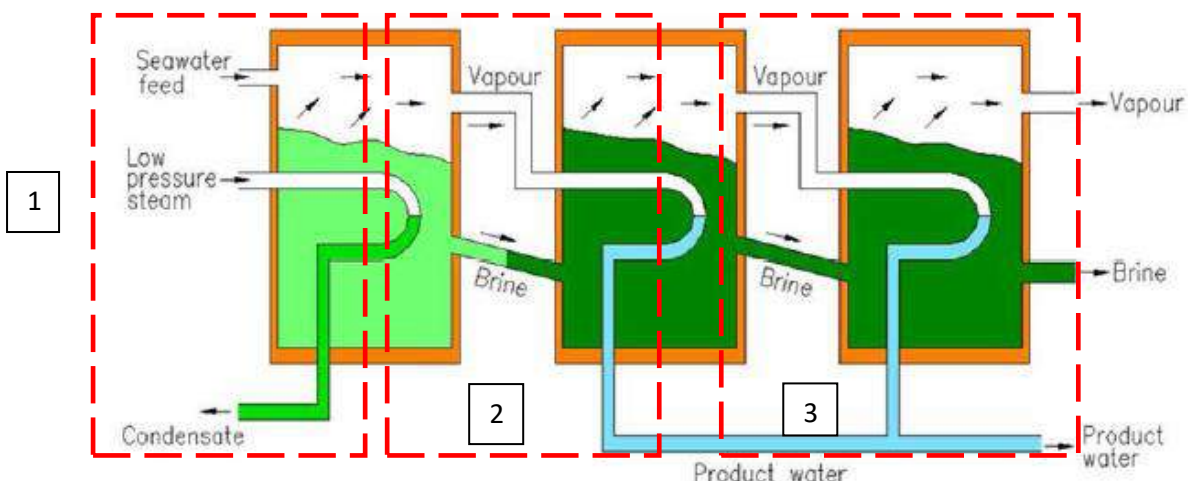
#### 4.2.1.2. Desalinización mediante múltiple efecto (MED)

Este método que tradicionalmente ha estado asociado a la industria, se utiliza para desalinizar agua desde 1960. Sin embargo, recién partir del año 2006, mejoras tecnológicas han permitido aumentar la capacidad en unidades desde 2.000 hasta 36.000 m<sup>3</sup>/día, haciéndola, por lo tanto, aplicable a la desalinización de agua para consumo. En este método, la calidad del agua obtenida es la misma que para el MSF.

<sup>63</sup> Fuente: <https://www.gepower.com/cogeneration/mx/es> (acceso el 01/12/20118)



Al igual que en el MSF, el proceso consiste en diferentes etapas donde la presión se disminuye de forma de lograr las sucesivas evaporaciones sin necesidad de agregar calor adicional. Sin embargo, el MED se caracteriza por trabajar a baja temperatura, a unos 70° C. Esto se debe a que el evaporador es del tipo de película delgada, y presenta mejores coeficientes de transferencia de calor que en el MSF. Los evaporadores pueden adoptar una configuración de tubo vertical con película ascendente, de tubo horizontal y vertical con película descendente y las del tipo plato.



**Figura 30 – Esquema de desalinización mediante MED**

En el proceso MED el agua es calentada hasta lograr la ebullición en la primera etapa. Esto se logra rociando el agua de forma uniforme sobre varios evaporadores. Por los tubos, y para permitir la evaporación del líquido circula vapor a baja presión, generalmente aportado por una caldera auxiliar, que condensa a la salida del tubo y es recirculado para ser reutilizado (ver N° 1 en Figura 30).

Solo una porción del agua que ingresa a la primera etapa logra ser evaporada, la restante alimenta la etapa siguiente del proceso. La porción que se ha transformado en vapor, también ingresa a la segunda etapa, pero como fuente de calor para alimentar un nuevo intercambiador de calor, que generará evaporación en la segunda cámara. El condensado es recolectado como agua tratada (ver N° 2 en Figura 30). De la misma forma, el vapor generado en la segunda etapa alimenta el intercambiador de la siguiente etapa. El vapor de la última etapa se condensa en el proceso de precalentamiento del ingreso de agua de alimentación (ver N° 3 en Figura 30).

Por lo general una planta MED contiene entre 16 y 80 etapas, estando limitado el número máximo por el rango de temperatura total disponible y la diferencia de temperatura entre etapas. Esta última es determinada por la elevación del punto de ebullición, las pérdidas de presión entre etapas y el caudal de destilado deseado. Generalmente, el GOR de una planta MED es el número de etapas menos uno. Por lo tanto, para una planta de GOR 7, son necesarias 8 etapas, valor mucho menor que para una planta de MSF equivalente, implicando un menor costo. La recuperación máxima alcanzable para este tipo de plantas oscila entre un 30 y 40%.

#### 4.2.1.3. Desalinización mediante compresión de vapor (VC)<sup>64</sup>

A diferencia de los métodos presentados previamente, el calor para la evaporación del agua proviene de la compresión del vapor, y no del intercambio directo con vapor producido en una caldera. Existen básicamente dos tipos diferentes de compresores que pueden ser utilizados en este proceso, el tipo mecánico (MVC) y el térmico (TVC). El VC es utilizado generalmente en plantas de pequeño a mediano tamaño, con capacidad de producción de hasta 10.000 m<sup>3</sup>/día para el MVC y 30.000 m<sup>3</sup>/día para el TVC. En este método, la calidad del agua obtenida es equivalente a la del MSF.

En la Figura 31 se muestra un esquema simplificado del método de desalinización por VC con compresor mecánico. El compresor genera vacío en el evaporador, lo que resulta en la evaporación parcial del agua ingresada al tratamiento (ver N° 1 en Figura 31). Este vapor atraviesa un *demister* y luego ingresa a un compresor, elevando así su presión y temperatura (P2 y T2 en Figura 31). Posteriormente, intercambia el calor con el agua de alimentación, (ver N° 2 en Figura 31) que es rociada sobre el intercambiador, produciéndose más vapor que repite el ciclo (ver N° 3 en Figura 31 donde aplican P1 y T1). El vapor dentro del intercambiador de calor condensa y es extraído como agua tratada. Previo a finalizar el tratamiento, el condensado atraviesa un nuevo intercambiador de calor para aportar su temperatura residual para precalentar el agua de alimentación a ser tratada.

Dentro del evaporador, el condensado que se va acumulando es captada por una bomba de recirculación (ver N° 4 en Figura 31). Se destaca que parte de la misma es recirculada y vuelve a ser rociada sobre el intercambiador, mientras que una porción es descartada. De esta forma, se mantienen controlados los niveles de salinidad del agua a evaporar.

En este tipo de plantas se requiere energía adicional durante la puesta en marcha para llevar el agua de mar hasta la ebullición. Esto se logra mediante el aporte externo de vapor de baja presión. Una vez alcanzada la temperatura de operación el mayor ingreso de energía al sistema es a través del compresor. El consumo de energía del compresor depende del caudal de vapor, la diferencia de temperatura en el evaporador y la temperatura de evaporación. Por otro lado, se destaca que estas plantas requieren muy poco pretratamiento del agua a tratar y, debido a la temperatura de operación, el riesgo de que se produzcan incrustaciones es medio.

El proceso utilizando un compresor térmico, es decir el TVC, es similar al explicado anteriormente, con la diferencia de la necesidad de contar con vapor a baja temperatura para accionar el compresor térmico. En estos procesos, la recuperación máxima de agua es del 40 al 50%.

---

<sup>64</sup> Al-Karaghoul, A. y Kazmerski, L. (2012). *Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling*. Paper presentado en conferencia Proceedings of the World Renewable Energy Forum, 3-17 Mayo de 2012, Denver, Colorado. (red.[6])

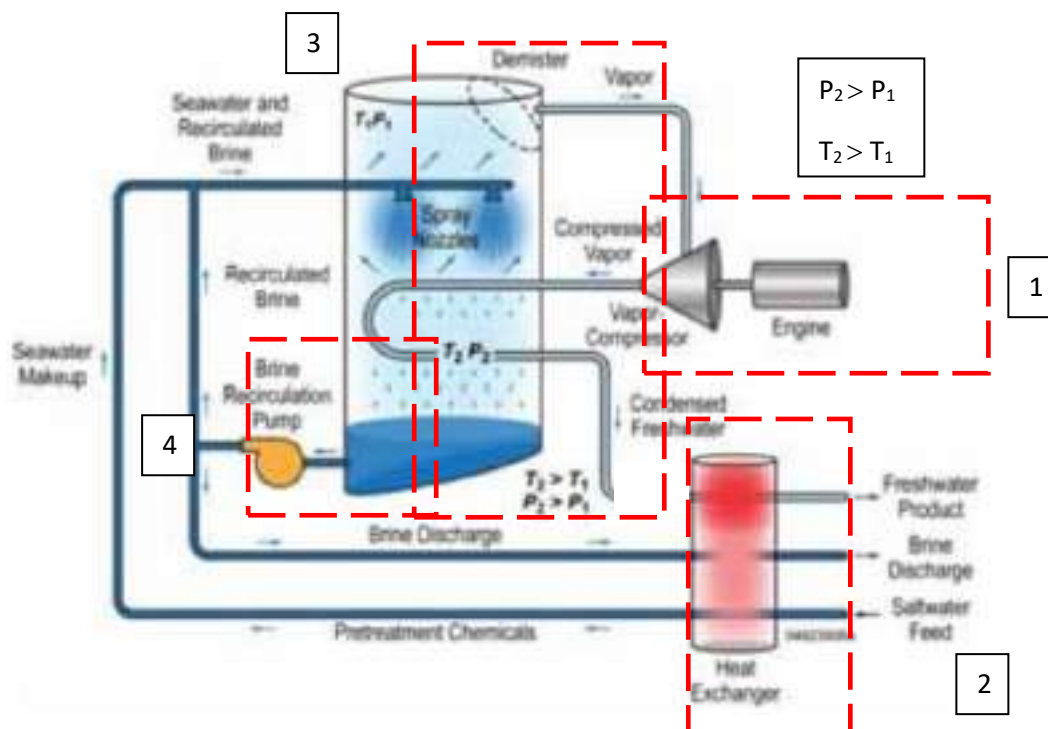


Figura 31 – Esquema de desalinización mediante VC, con compresor mecánico

#### 4.2.2. Procesos de desalinización de membrana

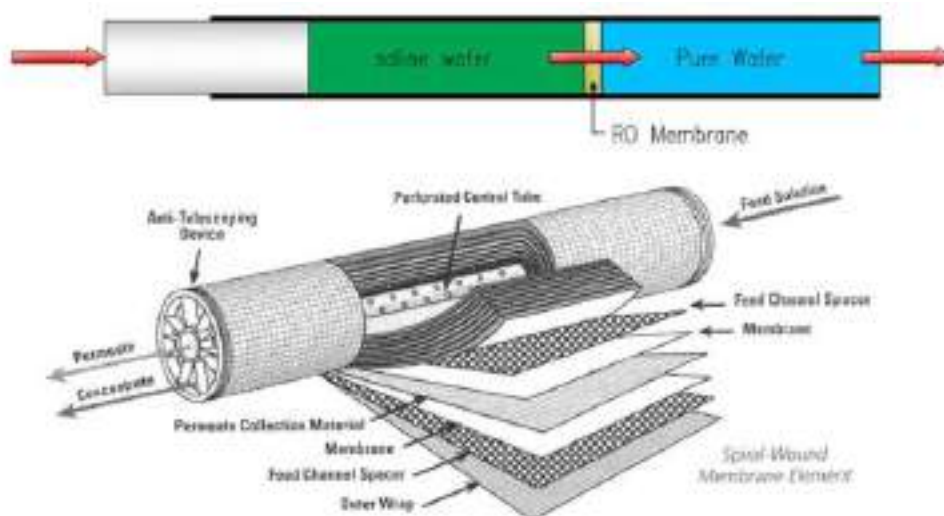
Este proceso utiliza membranas microporosas hidrofóbicas, es decir que son impermeables al traspaso de agua, pero no lo son a las sales. En función de las membranas que se seleccionen para el proceso, con los distintos polímeros que las forman y distinto tamaño de poros, se pueden lograr retener diferentes iones durante el proceso, principalmente las sales que se desean remover. Los principales procesos de desalinización de membranas son la Ósmosis Inversa (RO) y Electrodiálisis (ED), y están basados en procesos naturales de separación de sales tales como ósmosis y diálisis. Se destaca que mientras el RO trabaja con diferenciales de presión de entre 10 y 80 bar, el ED utiliza como fuerza conductora la diferencia de potencial entre ambas caras.

Existen otros procesos de membrana cuyo fin es el tratamiento y purificación del agua, pero no es la desalinización, tales como microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. Debido a que el fin de estos métodos no es el del proyecto planteado en la presente tesis, los mismos no se describen en la misma.

Debe destacarse que, debido a sus características, los procesos de membrana pueden ser utilizados para la desalinización de agua salobre, mientras que los térmicos solo se utilizan para agua salada.

##### 4.2.2.1. Desalinización mediante ósmosis inversa (RO)

La ósmosis es un fenómeno natural donde un líquido (solvente) atraviesa una membrana semipermeable desde el lado que presenta menor concentración de solutos hacia el de mayor, hasta que las concentraciones son iguales a ambos lados de la membrana. Al lograr el equilibrio, la diferencia de altura entre el líquido a ambos lados de la membrana es equivalente a la diferencia de presión osmótica de ambos lados. Si se aplica al lado que presenta mayor concentración de solutos una presión mayor a la presión osmótica, el flujo del solvente se da en sentido inverso. Es decir, que atraviesa la membrana desde el lado de mayor concentración al de menor. La cantidad de agua que atraviese la membrana es en función de la presión osmótica y la presión que se aplique. Este fenómeno se llama ósmosis inversa, y sirve para que la solución más concentrada en sólidos se concentre aún más, mientras que la que tiene menos sea más pura.



**Figura 32 – Esquema de proceso de ósmosis inversa**

En la Figura 33 se aprecia un sistema de desalinizado mediante RO. El pretratamiento indicado al inicio del proceso es fundamental para minimizar el riesgo de atascamiento de la membrana, y es más complejo que el requerido en los procesos térmicos descritos previamente. Generalmente este proceso consiste en desinfección con cloro, para controlar los crecimientos bacteriológicos, filtración para disminuir los sólidos totales suspendidos, y agregado de químicos para evitar obstrucciones. Sin embargo, y a pesar de este pretratamiento, al ser un método que se desarrolla a temperatura ambiente, los problemas de corrosión son prácticamente despreciables en relación a los procesos térmicos desarrollados en 4.2.1.

Debido a que la presión osmótica, y por ende la presión a inyectar, dependen de la concentración de las sales disueltas<sup>65</sup>, la cantidad de presión requerida en un proceso de desalinización de agua salobre (17 a 27 bar) es considerablemente menor que en agua marina (55 a 82 bar). De la misma forma, el consumo energético es de 1,5-2,5 KWh/m<sup>3</sup> y 4-6 KWh/m<sup>3</sup> respectivamente. Por lo tanto, en los EAU donde la salinidad del agua es mayor que el promedio, ver 3.1.5, es esperable que las plantas desalinizadoras de este método demanden más presión que en otros países del mundo.

Para mitigar el impacto del consumo de energía requerido por los equipos presurizadores, las plantas de RO han adoptado importantes medidas para aumentar la eficiencia energética, principalmente recuperando energía del filtrado que se desecha del proceso y fuera previamente presurizada. Esto se logra mediante el uso de turbinas tipo Pelton en la descarga que permiten recuperar entre el 20% y 40% de la energía consumida.

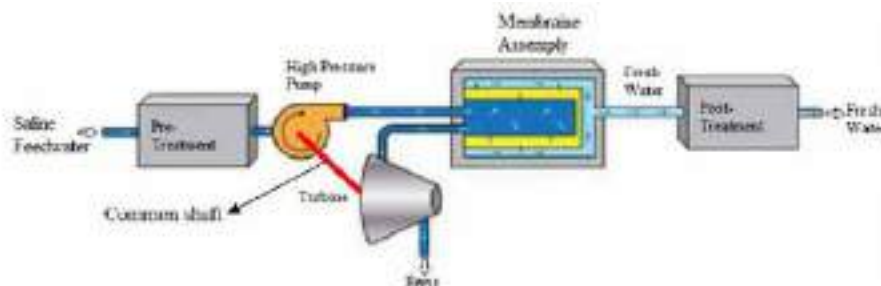
Las membranas suelen ser de poliamida, aunque también hay de acetato de celulosa. Si bien las primeras son más estables en un rango mayor de pH y permiten una mayor retención de sales, son más susceptibles a la degradación oxidativa producida por el cloro libre.

Adicionalmente, según su forma, puede ser de arrollamiento en espiral, de 100-150 cm de largo y 20-30 cm de diámetro, o de fibra hueca, de 120 cm de largo y 10-20 cm de diámetro. Es decir que las de fibra hueca presentan un área mayor de membrana por unidad de volumen, resultando en sistemas más compactos. Sin embargo, por este mismo motivo el flujo específico de agua por unidad de membrana es muy bajo, aumentando las incrustaciones y ensuciamiento de la membrana. Por tal motivo, los STS deben ser bajos para utilizar este tipo de membranas, lo que resulta en una mayor utilización en el mercado de membranas de arrollamiento en espiral.

<sup>65</sup> La presión osmótica se calcula mediante la expresión de Van't Hoff

Es importante destacar que ambos tipos de membrana sirven tanto para agua marina como salobre, dependiendo la elección de la misma de diversos factores tales como costo, capacidad de la planta y calidad del agua de ingreso.

Finalmente, en la etapa de post tratamiento se esteriliza y estabiliza el agua.



**Figura 33 – Esquema conceptual de un sistema de ósmosis inversa**

Si bien el uso de esta técnica admite capacidades de producción de menos de 0,1 m<sup>3</sup>/día, para la desalinización de agua se pueden encontrar plantas con varios cientos de unidades que pueden alcanzar, en total, capacidades de 128.000 m<sup>3</sup>/día, logrados en módulos de hasta 10.000 m<sup>3</sup>/día. Adicionalmente estas plantas son relativamente baratas de construir, son simples de operar y, debido al diseño modular que presentan, no es necesario parar toda la planta cuando es necesario hacer mantenimiento. Por todo esto es que ha aumentado tan drásticamente la incidencia del método RO en el mercado mundial, tal como puede observarse en la Figura 24. Como principales desventajas se resaltan el costo y periodicidad de cambiar las membranas, y los potenciales problemas de operar a presión elevada, aunque la tecnología de las membranas se encuentra en permanente modificación, logrando que sean cada vez más resistentes.

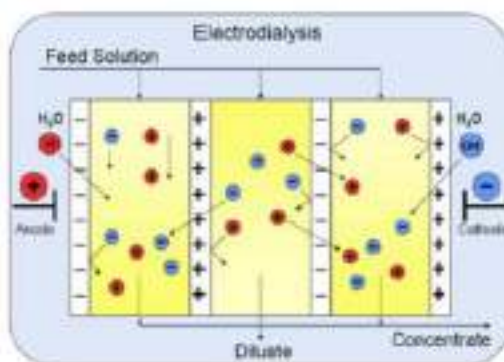
La recuperación de agua en una planta de RO es aproximadamente del 30 al 45% del agua de alimentación. Respecto a la calidad de agua obtenida, la misma contiene entre 41-500 ppm de STD. Si bien este valor está dentro de lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), no es suficientemente puro para la industria. Por lo tanto, en caso de ser necesario utilizar el agua para uso industrial, la misma deberá recibir un tratamiento adicional para acondicionarla a los requerimientos deseados.<sup>66</sup>

#### 4.2.2.2. Desalinización mediante electrodiálisis (ED)

El proceso de la ED se basa en el intercambio iónico ya que las sales disueltas en el agua son iones con carga positiva o negativa, y como tales se atraen a electrodos con carga de signo contrario. En la desalinización mediante ED se utilizan cientos de membranas con capacidad de captar cationes y aniones, aunque nunca los dos tipos en la misma membrana, ubicadas entre electrodos, tal como se puede observar en la Figura 34.

El agua a tratar circula de forma paralela a dichas membranas que, cuando son energizadas con corriente continua de baja tensión, generan que los iones sean atraídos hacia las mismas. Como mejora del proceso, en la denominada electrodiálisis inversa (EDR), la polaridad de las membranas se cambia cada aproximadamente 1 hora. Adicionalmente, en la EDR también se invierte el sentido de circulación del agua. De esta forma, se reduce considerablemente el atascamiento de las membranas, y por lo tanto se puede disminuir el pretratamiento del agua de alimentación.

<sup>66</sup>Ramilo, L., Gómez de Soler, S. y Coppari N. (2003). *Tecnologías de proceso para desalinización de aguas*. Revista de la CNEA, N° 3, Abril de 2003, 22-27. OP. Cit.



**Figura 34 – Intercambio iónico en una unidad de ED**

Diversos estudios han concluido que este método se torna más eficiente, ya sea desde el costo como la eficiencia energética, cuando las sales disueltas en la solución están en el orden de 4.000 a 5.000 mg/l, lo que representa un valor relativamente bajo.

#### 4.2.3.Comparación de procesos

En la Tabla 6 se presenta una comparación que permite apreciar de manera más sencilla las diferencias entre las distintas técnicas presentadas. A modo general puede afirmarse que los procesos de destilación o térmicos presentan considerables ventajas tales como mejor calidad del agua tratada, menor sensibilidad a los cambios en las características del agua de alimentación y menor costo de mantenimiento. Por su parte, los procesos de membrana requieren menor capital de inversión inicial, presentan mejor relación de producción en función del espacio ocupado, mayor posibilidad de ampliar la planta, debido a la modularidad con la que se diseñan, y menos problemas de corrosión e incrustaciones, por trabajar a temperatura ambiente.

Por otro lado, la Tabla 6 resalta los consumos energéticos demandados por cada uno de los métodos. Este aspecto tiene relevancia porque tiene una incidencia en el costo total de producción de entre el 60% y 40%, según el método considerado. Así puede apreciarse que el RO no consume energía térmica, lo que presenta la ventaja de no requerir una central de generación térmica acoplada, aunque consume más energía eléctrica, para el funcionamiento de las bombas, que MSF y MED.

Si bien los aspectos económicos de la desalinización serán abordados en el capítulo 7 bastará decir en esta instancia que el costo del agua desalinizada mediante RO es menor que para el resto de los métodos, a menos que la planta esté acoplada a una planta de generación térmica. En dicho caso, el hecho de obtener el vapor del escape de la turbina disminuye notablemente los costos de los procesos térmicos.

Finalmente, para desalinizar agua salobre, el método más eficiente depende de la cantidad de sales en suspensión. Para valores menores a 5000 ppm, el método ED es más efectivo que RO, mientras que si el valor es mayor es a la inversa.

CARACTERÍSTICA	VC		MED	MSF	ED	RO	
	MVC	TVC				SWRO	BWRO
Pretratamiento	mínimo	mínimo	mínimo	mínimo	elevado	muy elevado	muy elevado
Temperatura de operación	< 70°C	<70°C	64 a 70° C	90 a 110° C	T amb	T amb	T amb
Tamaño de planta / modulo máximo (m <sup>3</sup> /d)	10.000	30.000	36.000	75.000		módulos de 20.000	módulos de 20.000
Problema de incrustaciones	bajo	medio	medio	alto	bajo	bajo	bajo
Confiabilidad	moderada	moderada	muy alta	muy alta	alta	moderada	moderada
Calidad de descarga (% mayor de salinidad)				10 a 15% mayor			
Energía térmica consumida (kWth/m <sup>3</sup> )	0	63,05	40,27-63,88	52,3-78,33	0	0	0
Equivalente de energía eléctrica consumida (kWeh/m <sup>3</sup> )	0	14,5	12,2-19,1	15,83-23,5	0	0	0
Consumo eléctrico específico (kWeh/m <sup>3</sup> )	7-12	16,26	2-2,5	2,5-5	1,5-4	4-6	1,5-2,5

**Tabla 6 – Comparación entre distintas tecnologías de desalinización<sup>67</sup>**

#### 4.2.4.Desalinización mediante plantas híbridas<sup>68</sup>

Hasta aquí se han estudiado y comparado las distintas tecnologías de desalinización de agua por separado, sin embargo, los estudios indican que la tendencia a futuro serán las plantas desalinizadoras denominadas híbridas, es decir plantas compuestas por módulos tanto de membrana como térmicos. Esto se debe a que presentan grandes ventajas, en comparación con plantas desalinizadoras de una sola tecnología, tanto en aspectos económicos como funcionales de la planta.

En primera instancia, se destaca que se reduce la cantidad de agua de alimentación a tratar, si se utiliza el condensado del proceso térmico como alimentación de la planta de RO. Adicionalmente, se reduce el costo de pretratamiento necesario para una planta RO aislada, así como el costo energético necesario para el bombeo del agua.

Estas plantas híbridas presentan la ventaja de poder disponer de multiplicidad de calidades de agua tratada. Esto se debe a que la calidad del agua tratada con MED ronda entre 5-25 ppm de STD, mientras que la de RO está en 400-500 ppm de STD, siendo estos valores estándar para el agua de mar con salinidad normal. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), el valor ideal para el agua potable está entre 150-300 ppm se STD, valor más salino que el obtenido con MED, pero menos que RO.

Por otro lado, al mezclar el agua tratada de ambos procesos, es posible relajar la cantidad de STD del agua tratada del proceso RO, y por lo tanto extender la vida útil de las membranas de 3 a 5 años, generando un ahorro del 40%. Esto se debe a que, al mezclar el agua tratada mediante RO, con mayor cantidad de STD, con la del proceso térmico, MED o MSF, con valores

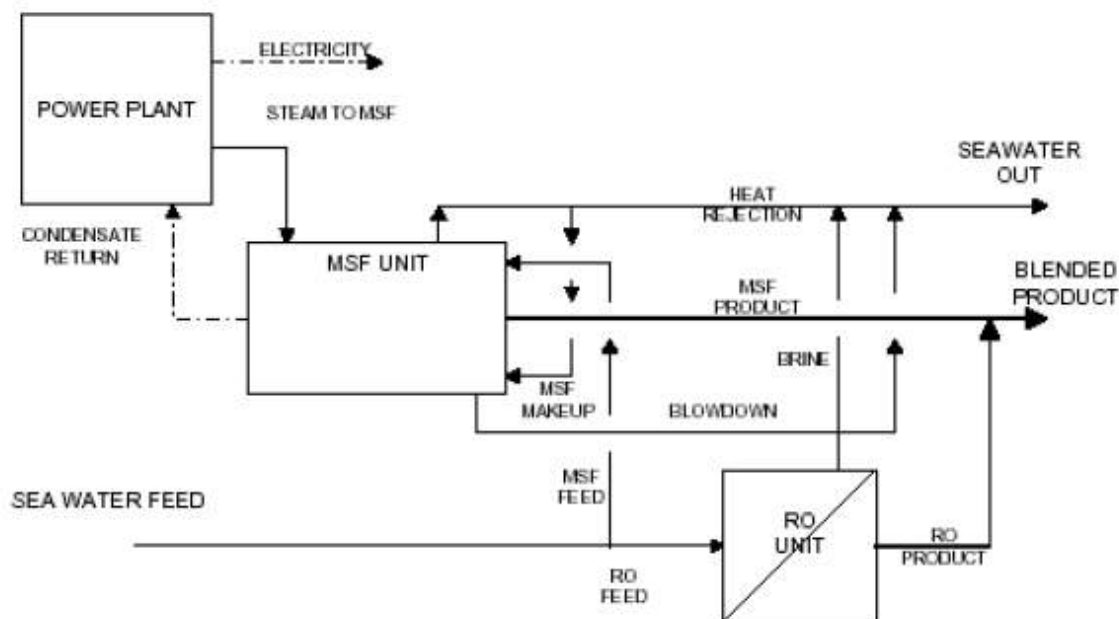
<sup>67</sup> Fuente: elaboración propia según bibliografía citada para el capítulo

<sup>68</sup> Fuente para toda la sección 4.2.4, salvo que se indique otra cosa: **International Atomic Energy Agency (2015). New Technologies for Seawater Desalination using Nuclear Energy, IAEA-TECDOC 1753, Viena, Austria.**[34]), pp.30-46



mucho menores, el agua puede presentar calidad apta para el consumo humano, sin necesidad de forzar las membranas. Adicionalmente, al mezclar las calidades de agua, no es necesario utilizar dos etapas de filtrado en el RO, ahorrando así en equipamiento y materiales. Por último, si se utiliza el agua condensada como alimentación del proceso de filtración, la temperatura con la que esta sale del mismo, aumenta la capacidad de las membranas en un 2% por grado centígrado.

Existen dos configuraciones para este tipo de plantas, las simples o las integradas. Las primeras, cuyo esquema se puede apreciar en la Figura 35, son las más sencillas y presentan todas las ventajas presentadas hasta ahora. Se aclara que, si bien en la figura se muestra el esquema para una planta térmica MSF, la misma puede ser también MED.



**Figura 35 – Esquema de planta híbrida simple, entre MSF y RO.**

Por su parte, las configuraciones integradas presentan algunas ventajas adicionales tales como permitir aumentar la temperatura de alimentación de la planta RO mediante la mezcla con el condensado de la planta MSF/MED, compartir el pre y post tratamiento del agua, alimentar la planta MSF/MED con el rechazo de la planta RO, aumentar el GOR de la planta térmica por la utilización de nanofiltrado como pretratamiento.

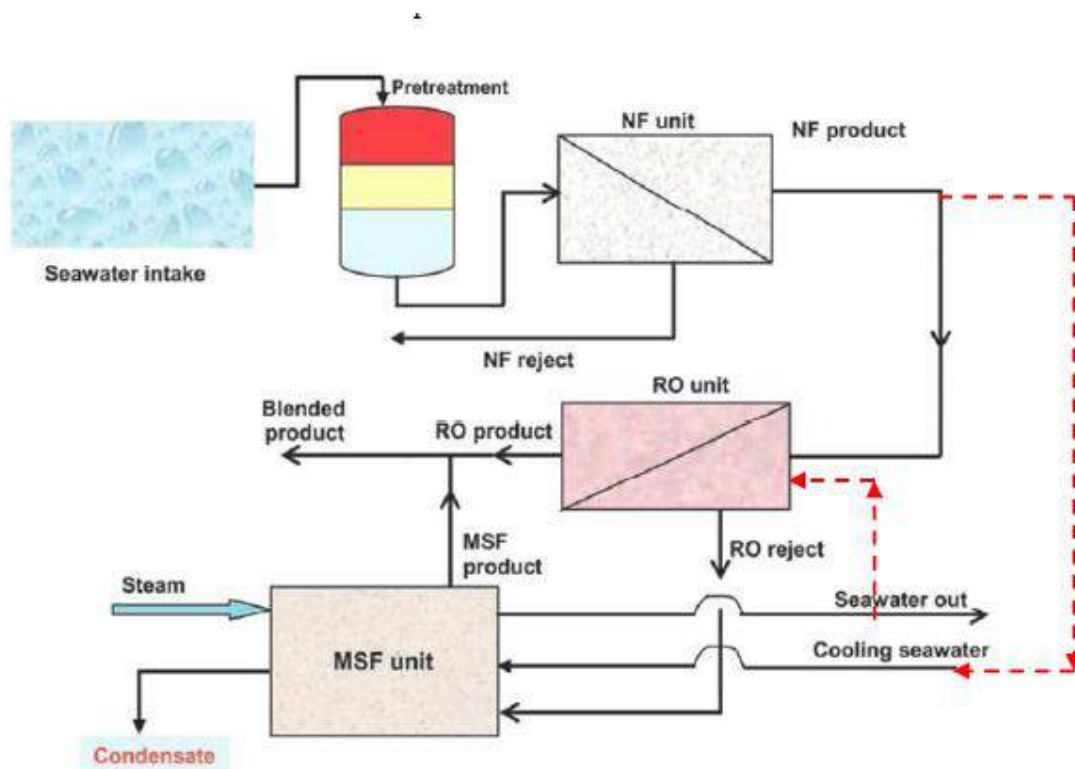
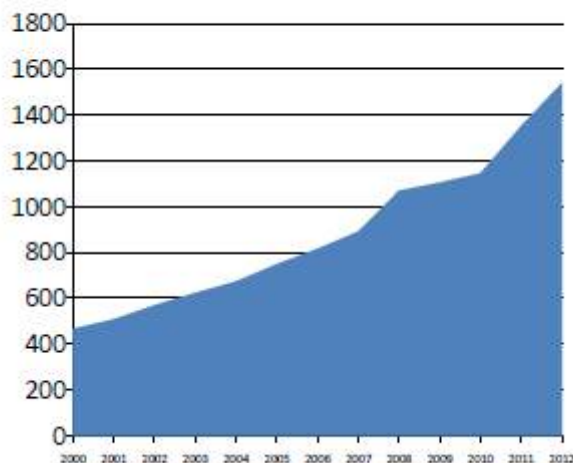


Figura 36 – Esquema de planta híbrida integrada, entre MSF, RO y nanofiltración.

#### 4.3. Desalinización de agua en EAU

En el capítulo 3.1.5 se comentó brevemente la incidencia del agua desalinizada en el volumen total consumido en el país, así como la ubicación de las principales plantas. En la presente sección se desarrollará más la historia y características de este proceso de obtención de agua dulce en los EAU.

En el año 1977 se instalan en los EAU las primeras tres plantas desalinizadoras, cada una respondiendo a una tecnología diferente (MSF, MED y RO), teniendo la mayor de ellas, la de MSF, una capacidad de 68.000 m<sup>3</sup>/d. Desde ese entonces, la producción creció exponencialmente en el país, pero siempre limitado a las tecnologías mencionadas previamente. De hecho, en la Figura 37 se puede observar cómo la pendiente de la curva de crecimiento de la capacidad instalada para el país presenta la misma pendiente de crecimiento que la curva presentada a nivel global en la Figura 22.



**Figura 37 – Capacidad instalada (en millones de galones imperiales por año) en EAU<sup>69</sup>**

Respecto a la distribución por tecnología, se puede observar en la Figura 38 que el MSF abarca casi el 70% de la capacidad instalada, valor que coincide con la participación de esta técnica en el Golfo Pérsico, presentada en la Figura 25. Tal como se ha mencionado en el capítulo 4.1 esto responde al hecho de que este tipo de plantas son eficientes al funcionar acopladas a una planta de generación térmica, fuente de energía que domina actualmente la matriz del país, así como al hecho de que ha sido la tecnología que dominaba el mercado en un comienzo, motivo por el que continuó expandiéndose en el país. Sin embargo, se espera que para el año 2021 la incidencia de la RO aumente ya que se encuentran en etapa de diseño construcción las plantas de Jubel Ali y Taweelah1 y 2, localizadas en [y Dubai respectivamente, con una capacidad entre las 3 de casi 1 millón de m<sup>3</sup>/d<sup>70</sup>. La proyección de estas plantas responde principalmente a las políticas energéticas fijadas para los próximos 50 años para los EAU, ver 3.2, donde se busca aumentar considerablemente la incidencia de las fuentes de energía no fósiles y, además, aumentar la eficiencia energética. Por lo tanto, y tal como se ha presentado en la sección 4.2.3, la desalinización mediante RO resulta la opción que demanda menos energía, y la que mejor se adapta a estas políticas.



**Figura 38 – Capacidad instalada por tecnología en EAU<sup>71</sup>**

<sup>69</sup> The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC) General Secretariat (2014). *Desalination in the GCC. The history, the present & the future*, Riad, Arabia Saudita. Op. Cit., p.24

<sup>70</sup> ADWEC [62]: <http://www.adwec.ae/Existing.html> (acceso el 29/07/2019)

<sup>71</sup> Masdar (2017). *Renewable energy water desalination programme, the new frontier of sustainable water desalination*. Octubre de 2017. En [https://masdar.ae/\(ref.\[43\]\)](https://masdar.ae/(ref.[43])), p.12

En sintonía con la tendencia en el cambio de tecnologías proyectadas a futuro, mencionadas en el párrafo anterior, se ha lanzado en el año 2013 un programa de desalinización mediante energías renovables. El mismo es conducido por el Instituto Masdar de Ciencia y Tecnología<sup>72</sup>, y cuenta con el auspicio de las principales compañías proveedoras de tecnología de desalinización como lo son Suez, Abengoa, Maseca, Trevi y SIDEM Veolia. En el programa se han construido 5 plantas piloto, de menos de 1.000 m<sup>3</sup>/d, cada una operada y construida con la tecnología de cada auspiciante, donde se prueban mejoras tecnológicas para aumentar la eficiencia y alimentar las plantas con energías renovables. Si bien no es el objetivo de la presente tesis describir en profundidad el programa, se menciona a los efectos de introducir las investigaciones que se están desarrollando en el país, y mencionar que en todos los casos la fuente energética utilizada es la energía solar, y las tecnologías estudiadas son RO.

Por todo lo mencionado anteriormente se concluye que lo más factible a la hora de pensar en un proyecto de la instalación de nuevas plantas de desalinización es el uso de la tecnología RO, o una híbrida con RO y MED.

---

<sup>72</sup> El Instituto Masdar es el organismo de Abu Dhabi encargado del estudio y promoción de las energías renovables, y es parte de la Universidad Khalifa de Ciencia y Tecnología.

## 5 ENERGÍA NUCLEAR – REACTOR CAREM

### 5.1. Introducción

Hasta aquí se ha mencionado en reiteradas ocasiones que se intenta demostrar la factibilidad de desalinizar agua mediante el uso de energía nuclear sin haber ahondado en los principios y características de este tipo de energía. En este capítulo, por lo tanto, se desarrollará el marco teórico adecuado para poder continuar con el estudio de factibilidad mencionado previamente.

### 5.2. Energía nuclear

#### 5.2.1. Estructura atómica e isótopos<sup>73</sup>

Debido a que el funcionamiento de un reactor depende de las interacciones de los neutrones con los núcleos atómicos, es necesario tener un conocimiento mínimo de la física atómica y nuclear.

El átomo está conformado por el núcleo, cargado positivamente, rodeado de electrones que poseen carga negativa que giran en órbitas alrededor del núcleo, de tal forma que el átomo resulta eléctricamente neutro. A su vez, el núcleo está conformado por neutrones y protones, ambos son denominados nucleones. Los primeros presentan carga neutra, y son los últimos los que dan la carga positiva al núcleo. Es el núcleo el que posee la mayor proporción de la masa del átomo.

El número másico, identificado con la letra A, de un núcleo representa el número de nucleones (neutrones y protones) que contiene. El número atómico, representado con la letra Z, es el número de protones presentes. Es el número atómico el que determina la naturaleza química de un elemento, debido a que éstas se determinan por la cantidad de electrones orbitales, que coinciden con el número de protones. A partir de esto, se puede afirmar que átomos cuyos núcleos contengan el mismo número de protones, aun cuando su número másico sea diferente, son idénticos desde el punto de vista químico. Estas especies de igual Z, pero distinto A, se denominan isótopos. Para identificar los distintos isótopos de un elemento, se escribe el número másico a continuación del símbolo del elemento en cuestión (ej.: O<sup>16</sup> y O<sup>17</sup>).

El uranio, que es actualmente el elemento más importante para la producción de energía nuclear, presenta en la naturaleza por lo menos tres formas isotópicas, de números másicos 234, 235 y 238. En el uranio natural el U<sup>238</sup> está presente en una proporción del 99,27%, mientras que el U<sup>235</sup> solo representa el 0,7%. El tercer isótopo tiene una incidencia casi despreciable en el proceso de generación de energía debido a su baja proporción.

#### 5.2.2. Energía nuclear, fuerzas de enlace y radioactividad<sup>74</sup>

Se ha demostrado que la masa real del núcleo es menor que la suma de las masas de los protones y neutrones que lo constituyen. Esta diferencia se denomina defecto másico y guarda estrecha relación con la energía de enlace, que es la encargada de mantener unidas a las partículas en el interior del núcleo, que se repelen por fuerza electrostática, y equivale a la energía que hay que suministrar al núcleo para romperlo en sus nucleones constituyentes. En la Figura 39 se aprecia la curva de las energías de enlace para distintos núcleos.

---

<sup>73</sup> Fuente de toda la sección: **Glasstone, S. y Sesonske, A. (1990). Ingeniería en Reactores Nucleares**, Editorial Reverté, Barcelona, España. (ref. [14]), pp.2-20

<sup>74</sup> *Ibidem*.

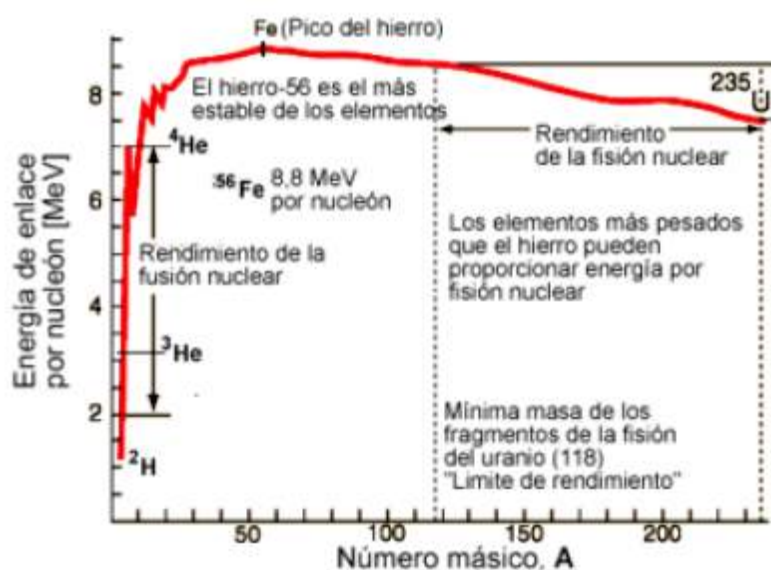


Figura 39 – Variación de energía de enlace por nucleón con el número másico<sup>75</sup>

La curva muestra que para números másicos pequeños la energía de enlace es baja, aumentando con el número másico hasta llegar a los 8 MeV para A entre 50 y 75. Desde este valor, a medida que continúa aumentando el número másico, la energía de enlace disminuye de forma gradual. Asimismo, de la curva se desprende que si dos núcleos ligeros ( $H_2$  o He), que ocupan posiciones bajas en la tabla, se fusionan para conformar un núcleo de mayor peso, o un núcleo pesado que ocupa posiciones más altas en la tabla (U o Th), se fisiona o divide en dos de peso menor, los núcleos que resulten estarán unidos con mayor fuerza, por lo que se libera energía.

Al ir aumentando el número atómico, la repulsión electrostática entre protones se va haciendo mayor y, por lo tanto, se necesitan mayor proporción de neutrones en el núcleo para que éste sea estable. Sin embargo, hay un límite en el exceso de neutrones sobre protones que el núcleo puede contener manteniéndose estable. Como consecuencia, los elementos de número atómico superior a 84 presentan solo isótopos inestables, que son los que presentan el fenómeno de la radioactividad.

Los núcleos radioactivos emiten una partícula, o radiación, transformándose así en un núcleo diferente, que puede ser o no estable. Los núcleos inestables pueden desprender partículas alfa (2 protones más 2neutrones), cargadas positivamente, o beta, con cargas negativas (electrones). En la mayoría de los casos, la desintegración radioactiva viene asociada a la emisión de rayos gamma, que son radiaciones electromagnéticas penetrantes de alta energía.

### 5.2.3.Reacciones neutrónicas – Fisión nuclear<sup>76</sup>

Un neutrón libre puede relacionarse con un núcleo atómico mediante tres interacciones diferentes: dispersión, captura y fisión. Para cualquiera de las tres, en primera instancia el neutrón debe ser absorbido por el núcleo, siendo denominado este núcleo compuesto en estado excitado.

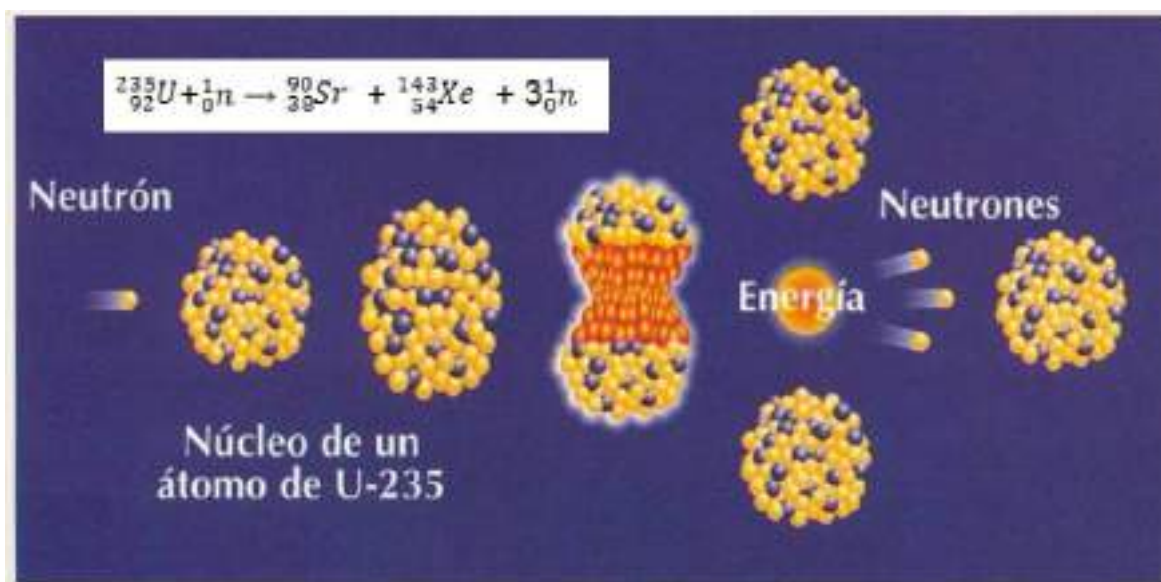
En el caso de la dispersión, el núcleo compuesto expulsa otro neutrón que contiene menor energía cinética que el que fue capturado, quedando excitado con el diferencial de energía. El

<sup>75</sup> MeV en el eje de las ordenadas significa "millón de electrón – voltios"

<sup>76</sup> Glasstone, S. y Sesonske, A. (1990). *Ingeniería en Reactores Nucleares*, Editorial Reverté, Barcelona, España.Op. Cit, pp.3-20

neutrón que se desprende suele tener una dirección diferente al absorbido. En lugar de liberar un neutrón, el núcleo compuesto excitado puede emitir su exceso de energía como radiación gamma, aumentando su número másico. Este proceso se conoce como captura, y el núcleo se transforma por lo tanto en un isótopo del núcleo original.

Como se mencionó anteriormente, el tercer proceso es la fisión nuclear y es el más relevante en el funcionamiento de los reactores nucleares. En este caso, el núcleo compuesto excitado se divide en dos núcleos más ligeros, llamados productos de fisión. Adicionalmente, en el proceso de fisión se desprende gran cantidad de energía (regida por la teoría de la relatividad postulada por Einstein) y de 2 a 3 neutrones de energía cinética  $E \sim 1 \text{ MeV}$ , que son en definitiva los que permiten que se produzca la reacción en cadena del proceso. Debido a que dichos neutrones de alta energía tienen baja probabilidad de fisionar al núcleo físil, es que es necesario frenarlo (moderarlo) hasta bajar su energía ( $\sim 1 \text{ eV}$ ) mediante sucesivas colisiones en el moderador, aumentando así aproximadamente 100 veces su probabilidad de fisionar. Los materiales moderadores pueden ser agua liviana, agua pesada (óxido de deuterio), berilio y grafito entre otros. En la **Figura 40** se puede observar esquemáticamente el proceso de fisión de un núcleo de Uranio 235. La energía liberada en cada reacción de fisión (200 MeV) se manifiesta en energía cinética de los productos de la reacción.



**Figura 40– Proceso de fisión del núcleo de un átomo de Uranio 235**

La reacción en cadena mencionada anteriormente es autosustentada bajo ciertas condiciones. En primera instancia es necesario la presencia de núcleos físil. Se denomina así a los núcleos que tienen alta probabilidad de fisión. Por otro lado, debe considerarse que, de los neutrones liberados, algunos se pierden por reacciones distintos a la fisión, y otros escapan del sistema. Estos neutrones que escapan pueden reducirse aumentando el tamaño, o masa, del material físil. Cuando dicha masa es tal que permite mantener la reacción en cadena, una vez que se ha iniciado, se denomina masa crítica. Es decir, la masa que equilibre los neutrones fugados con los generados. La masa crítica del  $\text{U}^{235}$  en geometría esférica es de alrededor de 8 kg.

Como ejemplo, la fisión total de 1 kg de  $\text{U}^{235}$  libera una energía equivalente a la de la combustión de 6 toneladas de carbón.

#### 5.2.4. Usos de la tecnología nuclear

Si bien la principal aplicación de la energía nuclear es la producción de energía eléctrica, y al margen de la desalinización de agua que se postula en la presente tesis, existen muchas otras



actividades que utilizan la tecnología nuclear, principalmente, y mediante el uso de distintos radioisótopos.<sup>77</sup>

En cuanto al uso pacífico de la tecnología, se destaca la medicina nuclear. De hecho, uno de cada tres pacientes que acuden a un hospital en un país industrializado utilizan directa o indirectamente aplicaciones nucleares. Ya sea para el diagnóstico por imágenes, como para el tratamiento oncológico mediante rayos, o incluso para la esterilización de los instrumentos médicos.

Por otro lado, en el sector agropecuario se utilizan los radioisótopos para el control de plagas mediante la esterilización de los insectos, aumentando el tiempo de conservación de los alimentos, y permitiendo así el transporte de los mismos, o incluso su exportación. Finalmente, se estudia la erosión hídrica y se trabaja en la reproducción y nutrición de animales.

### 5.2.5. Combustible nuclear

Como se ha mencionado anteriormente el uranio, ya sea natural o enriquecido, es el principal combustible utilizado por los reactores nucleares para la generación de energía. El uranio se encuentra en la naturaleza y se obtiene mediante extracciones mineras. Si bien esto implica que es un combustible que presenta los mismos problemas que los hidrocarburos, por no ser renovables, el poder energético que tiene, así como el consumo mundial hace que las reservas de este mineral no corran riesgos de agotamiento en el futuro cercano. De hecho, las reservas razonablemente aseguradas más las inferidas, alcanzaron hacia fines del año 2011 los 5 millones de toneladas, mientras que el consumo mundial anual es aproximadamente de 50 mil toneladas.

En la Figura 41 se muestra a los principales países con reservas de uranio. Se aprecia que los EAU no cuentan con reservas de uranio, por lo que deberán importar dicho combustible. De todas formas, se debe considerar que, aun contando con dicho mineral, el proceso de fabricación de pastillas de uranio es complejo, y pocos países cuentan con la tecnología para realizarlo. Debido a que escapa al alcance del presente trabajo, solo se mencionará que el mismo está compuesto por diversas etapas entre las que incluyen la extracción minera, la purificación, el enriquecimiento y la fabricación del combustible.

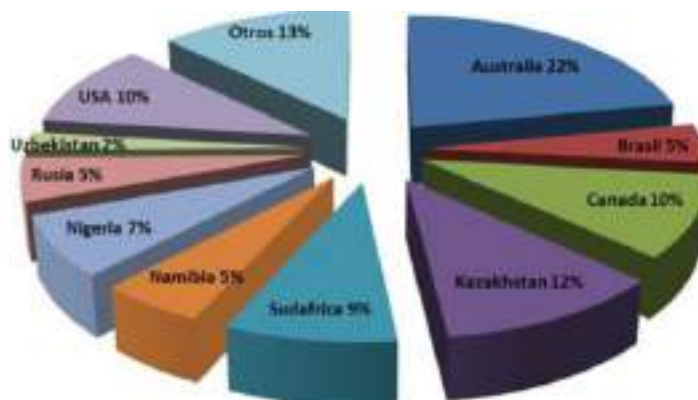


Figura 41 – -Reserva mundial de uranio a 130 U\$S /ton<sup>78</sup>

<sup>77</sup> Energía-Nuclear, (ref. [66]): <https://energia-nuclear.net/aplicaciones> (acceso el 24/09/2018)

<sup>78</sup> Fuente: European Nuclear Society

### 5.3. Tipos de Reactores

#### 5.3.1. Conceptos básicos

La mayoría de los reactores nucleares emplean el calor liberado en las reacciones de fisión para hacer evaporar agua y utilizar el vapor resultante para hacer girar una turbina asociada a un generador eléctrico, en un ciclo termodinámico denominado ciclo Rankine. En la Figura 42, el reactor nuclear proporciona el calor necesario al evaporador,  $q_{in}$ .

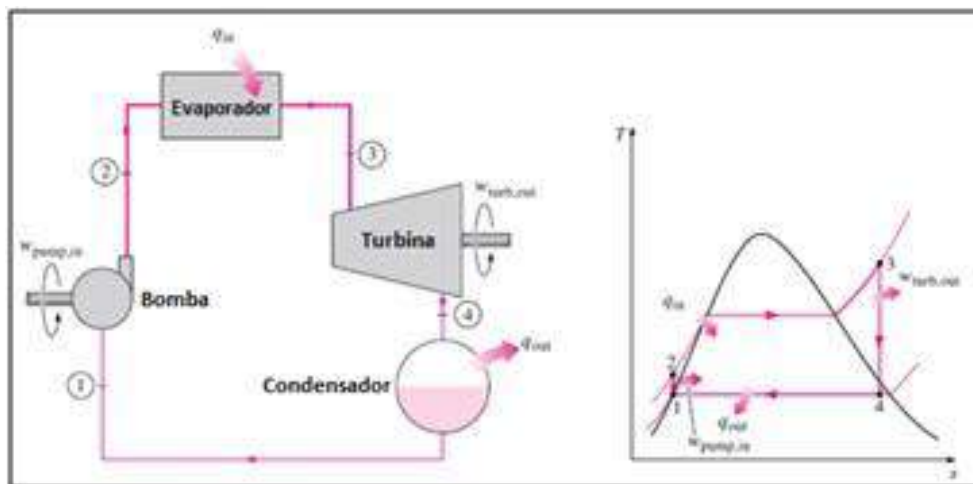
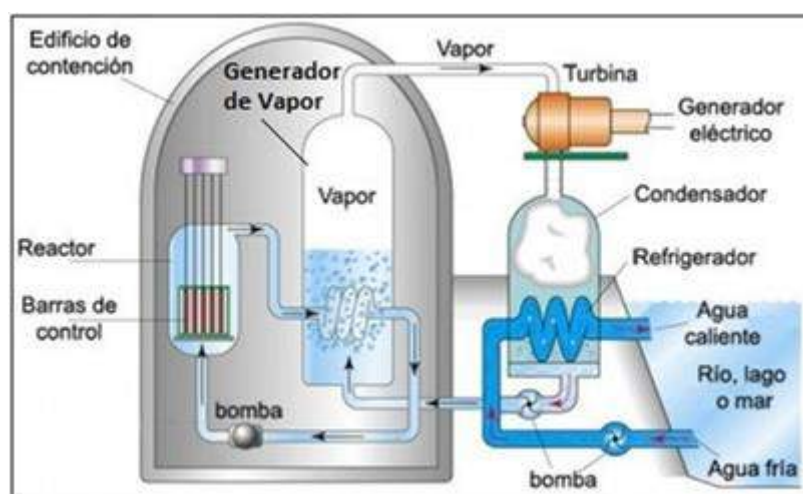


Figura 42 – Ciclo Rankine

Un reactor nuclear se compone de tres ciclos, uno primario, otro secundario, y uno terciario, como se muestra en la Figura 43. El ciclo primario, dentro del edificio de contención, incluye el reactor propiamente dicho, que contiene las barras de combustible nuclear y las barras de control, que permiten variar la cantidad de calor generado, una bomba centrífuga que hace circular el refrigerante que extrae el calor generado en el núcleo del reactor, y un generador de vapor que recibe ese calor y lo utiliza para evaporar el agua del circuito secundario. El circuito secundario es un ciclo Rankine compuesto por una turbina, un condensador y una bomba centrífuga, como el mostrado en la Figura 42. El terciario es un ciclo abierto que toma agua de un sumidero de calor (río, lago o mar) y la utiliza para condensar el vapor del ciclo secundario en el condensador.<sup>79</sup>



<sup>79</sup> Veaute, L. (1994). *Generación de Energía Eléctrica*, Ediciones Homo Sapiens, Rosario, Argentina. (ref.[60]), pp.103-26.

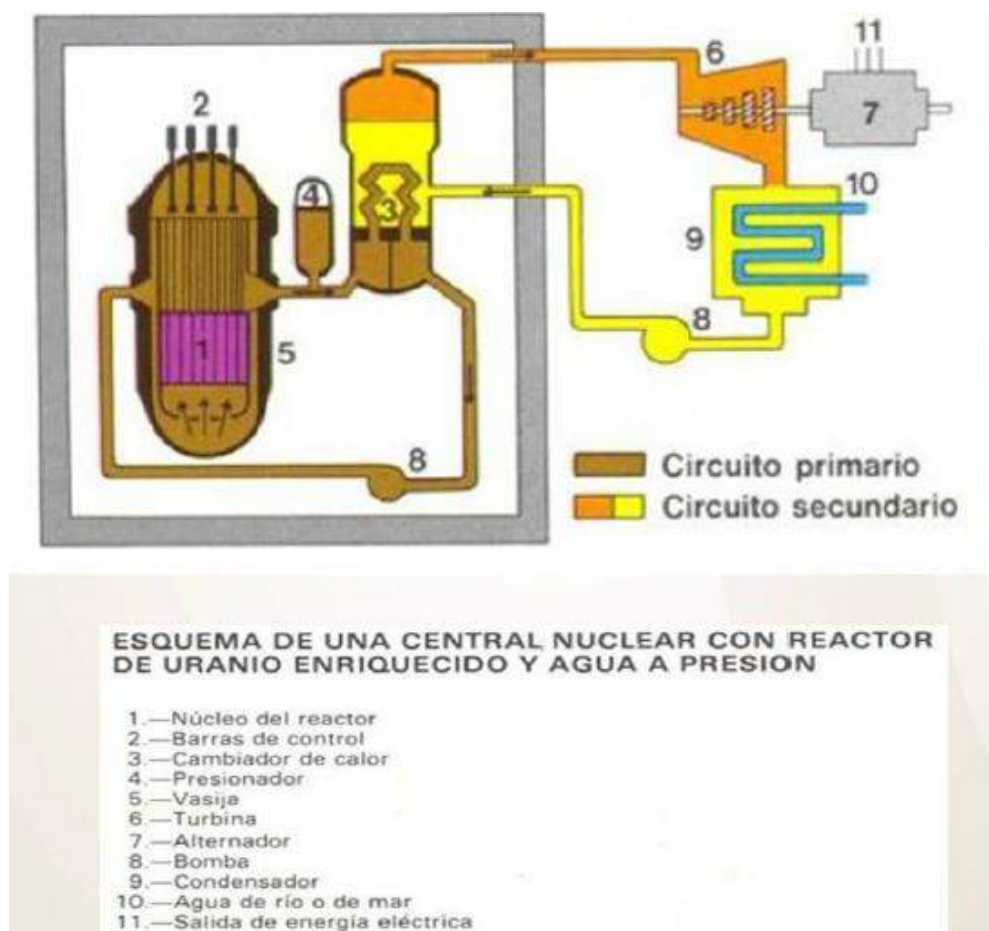
**Figura 43 – Esquema de un reactor nuclear**

5.3.2.Reactor agua presurizada (PWR<sup>80</sup>).

Los reactores nucleares pueden ser clasificados según su uso, es decir si son de investigación o de potencia, el tipo de combustible, uranio natural o enriquecido, el moderador, fluido refrigerante, etc. Todo esto genera una gran variedad de configuraciones, sin embargo, a los efectos del presente trabajo, se desarrollarán en detalle únicamente los reactores PWR, por ser el tipo al que pertenece el CAREM, y ser el más difundido en el mundo.

En la Figura 44 pueden observarse los elementos constitutivos principales, entre los que se destaca el recipiente de presión, que es donde se alojan los combustibles nucleares. Utiliza uranio enriquecido al 2% o 3% y agua liviana como moderador y refrigerante.

El agua del circuito primario calentada en el interior del núcleo (1) por la fisión, se dirige al generador de vapor (3) donde se produce el intercambio de calor con el agua del circuito secundario, la cual circula a temperatura más fría y a menor presión. Esto permite que al entrar en contacto con el generador de vapor se produzca la ebullición del agua del secundario, generando vapor que posteriormente alimenta la turbina (6). El agua del circuito primario, por su parte, retorna nuevamente al núcleo mediante bombas (8). El vapor del circuito secundario alimenta la turbina y luego es transportado al condensador de vapor (9), retornando posteriormente, en estado líquido, al generador de vapor mediante una bomba. La referencia 4 de la Figura 44 responde al presurizador, que como su nombre lo indica, es el componente que mantiene la presión estable en el circuito primario.



<sup>80</sup> PWR son las siglas en inglés de Pressurized Water Reactor

### Figura 44 – -Esquema de un PWR

Es importante destacar que el agua del circuito primario y el secundario no se mezclan, por lo que no es necesario protección radiológica en la zona de generación de energía eléctrica (turbina – generador), y no hay riesgos de contaminación de la fuente fría condensación (circuito terciario (10)), que suele ser ríos, lagos o mares.

#### 5.3.3.Otros tipos de reactores

Los reactores agua pesada presurizada (PHWR<sup>81</sup>) son muy similares al PWR, con la diferencia de que utilizan agua pesada como moderador y refrigerante y uranio natural como combustible. Si bien las centrales Atucha I y II cuentan con este tipo de reactores, son los del tipo CANDU los que dominan este segmento.

Por otro lado, los reactores de agua en ebullición (BWR<sup>82</sup>) representan el segundo tipo de reactores más utilizados. También utiliza uranio enriquecido como combustible y agua liviana en ebullición como moderador.

Los reactores refrigerados con gas (GCR<sup>83</sup>) utilizan uranio natural como combustible y grafito como moderador. El refrigerante que se utiliza puede ser helio o dióxido de carbono, siendo preferente la mayoría de las veces el último debido a que resulta más económico.

Finalmente, los reactores rápidos reproductores (FBR<sup>84</sup>) son reactores que generan más material fisible del que consumen, por lo que tienen un mejor aprovechamiento del uranio del combustible que un PWR o BWR. El combustible de estos reactores se basa en plutonio (Pu-239), isótopo fisible, y uranio natural que contienen entre un 99% y 100% de Uranio-238. Utilizan metales en estado líquido como refrigerante, para no retardar los neutrones rápidos producidos en la fisión, tales como el plomo, mezclas de sodio y potasio, y sodio.<sup>85</sup>

#### 5.3.4.Reactores nucleares en el mundo

En la Tabla 7 puede apreciarse que, de la cantidad de reactores en operación en el mundo hacia el año 2015, el 65% corresponden a reactores PWR y 17% a reactores BWR. Adicionalmente, la tabla permite observar qué países se han centrado en el uso de cada una de las tecnologías. Como se ha mencionado en el capítulo 3.2.2, en el caso de los EAU, se están construyendo reactores PWR de 1.400 MWe.

---

<sup>81</sup> PHWR son las siglas en inglés de Pre Pressurized Heavy Water Reactor

<sup>82</sup> BWR son las siglas en inglés de Boiling Water Reactor

<sup>83</sup> GCR son las siglas en inglés de Gas - Cooled Reactor

<sup>84</sup> FBR es la sigla en inglés de Fast Breeder Reactors

<sup>85</sup> **Khodarev, E. (1978).** *Los reactores reproductores rápidos de metal líquido*, publicado en Boletín OIEA Vol. 20, n° 6, OIEA.

En: [https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/\(ref.\[41\]\)](https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/(ref.[41]))

Reactor type	Main countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurised water reactor (PWR)	US, France, Japan, Russia, China	292	275	enriched UO <sub>2</sub>	water	water
Boiling water reactor (BWR)	US, Japan, Sweden	75	73	enriched UO <sub>2</sub>	water	water
Pressurised heavy water reactor (PHWR)	Canada, India	49	25	natural UO <sub>2</sub>	heavy water	heavy water
Gas-cooled reactor (AGR & Magnox)	UK	14	8	natural U (metal), enriched UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	graphite
Light water graphite reactor (RBMK & EGP)	Russia	11 + 4	10	enriched UO <sub>2</sub>	water	graphite
Fast neutron reactor (FBR)	Russia	3	1.4	PuO <sub>2</sub> and UO <sub>2</sub>	liquid sodium	none
TOTAL		448	392			

**Tabla 7 – Cantidad de reactores en operación al año 2015, por tipo de reactor.<sup>86</sup>**

Por otro lado, en la Figura 45 se puede apreciar que los países que poseen mayor cantidad de reactores en operación son Estados Unidos con 99 unidades, Francia con 58, Japón con 43 y China y Rusia con 36. Argentina, por su parte, cuenta con 3 reactores en operación (Atucha I y II y Embalse). Si bien EEUU presenta mayor cantidad de reactores en operación, el caso de Francia es significativo pues más del 70% de su matriz energética es aportada por la energía nuclear, contra el 20% de los norteamericanos.

<sup>86</sup> WNA (ref.[78]): <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (acceso 01/10/2018)

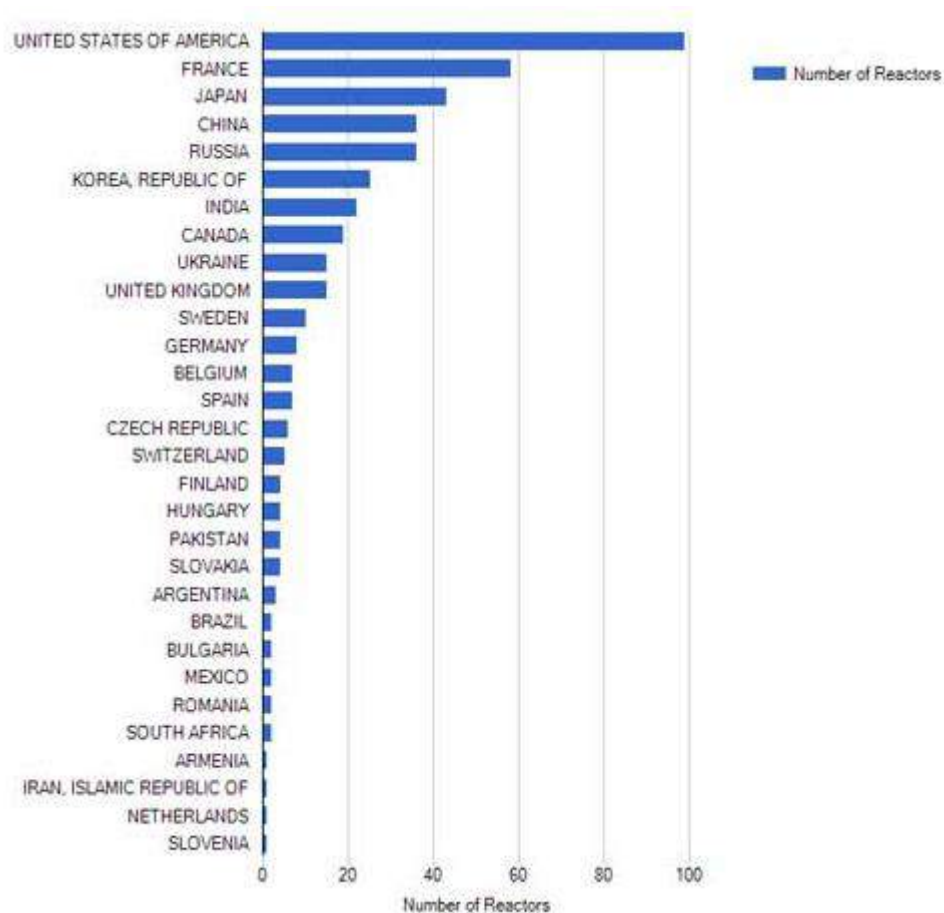


Figura 45 – Cantidad de reactores en operación, por país, a noviembre de 2016<sup>87</sup>

Finalmente, en la Figura 46, se puede apreciar que, de las tecnologías seleccionadas para los reactores en construcción, los PWR continúan siendo mayoría con la tendencia de los reactores en operación actualmente.

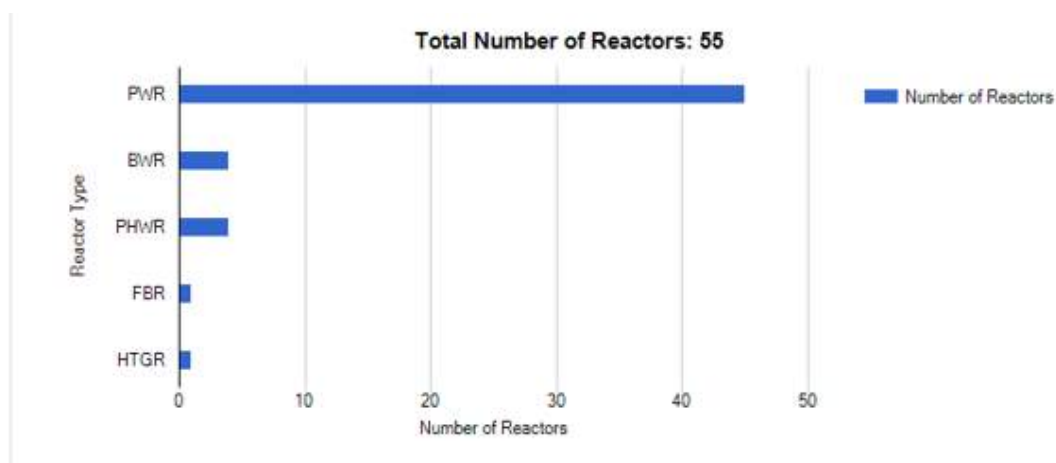


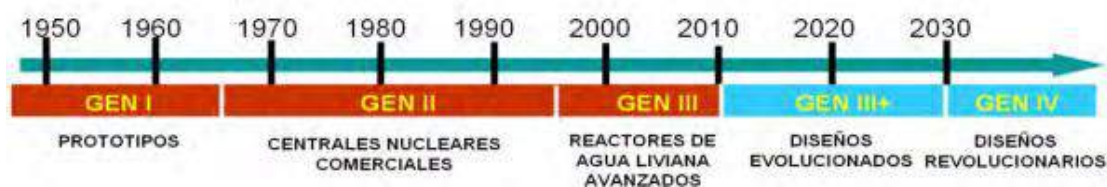
Figura 46 – Cantidad de reactores en construcción, por tipo de reactor<sup>88</sup>

<sup>87</sup> ENS (ref. [67]: <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/nuclear-power-plant-world-wide.htm>) (acceso 01/10/2018)



### 5.3.5. Generación de reactores<sup>89</sup>

Cuando se habla de reactores nucleares hay un consenso general en catalogarlos, además de las características de diseño mencionadas en los capítulos 5.3.1 a 5.3.3, entre distintos tipos de generaciones. Las mismas se diferencian por las características generales que presentan los diseños, asociadas generalmente a la época en el que fueron proyectadas. En la Figura 47 se pueden apreciar las distintas generaciones de reactores a lo largo de los años.



**Figura 47 – Generación de reactores a lo largo de los años**

De esta forma, en los primeros años de la energía nuclear se han desarrollado los reactores de primera generación. Generalmente han sido prototipos para reactores comerciales, y ya se encuentran desmantelados. Los de segunda generación, por su parte, son los construidos entre las décadas de 1960 y 1970, y corresponde a la mayoría de reactores en operación. Los sistemas de seguridad suelen ser activos, es decir que requieren energía eléctrica o intervención de operadores para funcionar.

A partir de la década de 1990 se han diseñado los denominados reactores de tercera generación, aunque muy pocos han entrado en operación. Los diseños se basan en los reactores de segunda generación, aunque con mejoras sustanciales en los sistemas de seguridad, presentándose mayoritariamente sistemas pasivos, es decir, que no requieren energía u operadores para funcionar. Adicionalmente se han producido cambios en los diseños de los combustibles, logrando mejores aprovechamientos de los mismos. Finalmente se destaca que este tipo de reactores tienden a la modularidad, es decir que se fabrican distintos módulos en paralelo y luego se ensamblan en sitio, de forma de reducir los costos de construcción, operación y mantenimiento.

A partir de Fukushima, en el año 2011, se han introducido cambios adicionales en los diseños de los reactores nucleares, que ha producido la denominada generación III+ de reactores, que son más seguros. Principalmente contemplan el aumento de las redundancias de los sistemas, minimización de riesgo de fusión de núcleo y mayor cantidad de sistemas de seguridad pasivos. De hecho, este tipo de reactores presenta una frecuencia de daño de núcleo (CFD<sup>90</sup>) menor a  $10^{-7}$ . 1/año, y una frecuencia de liberación a gran escala, LRF<sup>91</sup>, de radiación menor a  $10^{-8}$ .

Por último, la cuarta generación de reactores son los diseños del futuro. Hay muchas líneas de diseño sobre las que se avanzará en los próximos años en prototipos para probar las distintas tecnologías. Se esperan cambios en los combustibles, aumentando el protagonismo del torio, y se espera que produzcan menor cantidad de residuos nucleares. Se debe destacar que es indispensable la retroalimentación proporcionada por la operación de los reactores de generación III y III+.

<sup>88</sup> PRIS (ref. [71]): <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx> (acceso 25/10/2018)

<sup>89</sup> Todo el capítulo de: **Higa, M. (2012). Una mirada a las generaciones de reactores nucleares de potencia**, Publicado en libro Hojitas de Conocimiento, Edición 2012, Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, CNEA, Buenos Aires, Argentina.(ref.[19]).

<sup>90</sup> CFD proviene de las siglas en inglés de Core Frequency Damage

<sup>91</sup> LRF proviene de las siglas en inglés de Large Release Frequency



### 5.3.6. Reactores SMR

#### 5.3.6.1. Concepto

Desde el desarrollo de los primeros reactores la potencia de los mismos ha ido incrementando desde unos pocos MWe hasta alcanzar más de 1.400 MWe. Sin embargo, en este período de crecimiento tecnológico también se han desarrollado muchos reactores de pequeña y mediana escala, principalmente para uso de propulsión naval. La IAEA define a un reactor como pequeño cuando este tiene una potencia eléctrica de menor de 300 MWe, y mediano para los que se encuentran entre este valor y los 700 MWe. En conjunto, forman los denominados SMRs (*Small Modular Reactors*).

Los SMR se distinguen por:

- Presentar una arquitectura compacta y, generalmente, utilizar métodos pasivos de seguridad.
- Al presentar diseños compactos y modulares, permiten la prefabricación de componentes y, por lo tanto, aumentar la calidad final obtenida.
- Menor potencia que los reactores convencionales, por lo que se reduce el inventario radioactivo.
- Posibilidad de construirse parcial o totalmente bajo tierra, disminuyendo así el riesgo de impacto de tsunamis o de atentados.
- Posibilidad de contar con múltiples unidades en un mismo sitio, para poder alcanzar mayor potencia.
- Menor requerimiento de agua de enfriamiento y, por lo tanto, capacidad de ser instalados en zonas más áridas.
- Menores tiempos de construcción que los reactores convencionales.

A pesar de las ventajas previamente mencionadas, debe tenerse en cuenta que el licenciamiento, proceso por el que todo reactor nuclear debe transitar previamente a su puesta en marcha, no es menos complejo y demandante que en los reactores convencionales.

Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el interés de la comunidad internacional y de los países nucleares en los SMR debido a que presentan un costo de capital menor que los reactores convencionales, y permiten alimentar redes eléctricas de menor tamaño o sitios remotos. Por otro lado, al tener potencia menor son aptos para países que tengan poca experiencia en la operación de reactores de gran escala, o que tengan redes eléctricas chicas (por cuestiones vinculada a estabilidad de la red eléctrica, un reactor, por sí solo, no puede representar más de un 10% de la capacidad instalada de la red). En definitiva, al presentar diseños simplificados basados en elementos modulares y presentar menores tiempos de construcción, los SMRs se postulan como una inversión más controlada que los reactores convencionales. Tal es así, que en el año 2009 la IAEA estimaba que para el año 2030 se encontrarían en operación entre 96 y 46 SMR.<sup>92</sup>

#### 5.3.6.2. SMRs en operación, en construcción y en etapa de ingeniería conceptual

Actualmente se encuentran 3 SMRs en operación, que pueden ser apreciados en la Tabla 8. Los mismos han sido diseñados y construidos en la década del 80 o antes, por lo que son considerados reactores de generación II (ver 5.3.5). Debido a que son diseños antiguos, sobre los

---

<sup>92</sup> WNA (ref.[78]); <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx> (acceso 29/09/2018)

que no hay planes para continuar su producción, no se desarrollarán con mayor detalle que el que presentan en la tabla mencionada.

Nombre	Capacidad	Tipo	Desarrollador	Inicio Construcción	Entrada en operación
CNP-300	300 MWe	PWR	SNERDI/CNNC, Paquistán y China	1985	1994
PHWR-220	220 MWe	PHWR	NPCIL, India	1965	2005
EGP-6	11 MWe	LWGR	Rusia	1966	1974

**Tabla 8 – SMRs en operación al año 2018<sup>93</sup>**

De acuerdo a la IAEA existen en desarrollo aproximadamente 50 diseños de SMRs en distintos grados de avance. Entre ellos, actualmente hay 5 diseños que se encuentran en una etapa de construcción avanzada, tal como se puede observar en la Tabla 9.

Nombre	Capacidad	Tipo	Desarrollador
KLT-40S	35 MWe	PWR	OKBM, Rusia
RITM-200	50 MWe	PWR integrtal	OKBM, Rusia
CAREM-25	27 MWe	PWR integrtal	CNEA, Argentina
HTR-PM	211 MWe	HTR	INET, CNEC y Huaneng, China
ACPR50S	60 MWe	PWR	CGN, China

**Tabla 9 – SMRs en construcción al año 2018**

En los capítulos 5.4.2 y 5.5 se hará un breve resumen de las características principales de cada uno, pues se entiende que son los potenciales reactores que podrían alimentar una planta de desalinización de agua.

Por último, se listan en la Tabla 10, solo a título informativo, otros diseños de SMRs que se encuentran en etapa de ingeniería, aunque aún no se están construyendo.

Nombre	Capacidad	Tipo	Desarrollador
VBER-300	300 MWe	PWR	OKBM, Rusia
NuScale	60 MWe	integral PWR	NuScale Power + Fluor, USA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canadá
ACP100	125 MWe	integral PWR	NPIC/CNPE/CNNC, China
SMART	100 MWe	integral PWR	KAERI, South Corea

<sup>93</sup> *Ibidem.*

PRISM	311 MWe	FNR de sodio	GE Hitachi, USA
ARC-100	100 MWe	FNR de sodio	ARC, USA
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Canadá
BREST	300 MWe	FNR de plomo	RDIFE, Rusia
SVBR-100	100 MWe	FNR de plomo	AKME-engineering, Rusia

**Tabla 10 – SMRs en etapa de ingeniería básica**

## 5.4. Reactor CAREM

### 5.4.1. Generalidades

El CAREM es un reactor integrado del tipo PWR, que utiliza agua liviana como moderador y refrigerante, cuyo prototipo se encuentra actualmente en construcción en la localidad de Lima, Provincia de Buenos Aires, próxima a las centrales Atucha I y II. Tanto el diseño como la construcción están siendo llevadas a cabo por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), en lo que representa el primer desarrollo de un reactor de potencia de la Argentina. El mismo ha sido diseñado tanto para la generación eléctrica, especialmente en zonas remotas o alejadas de la red eléctrica, como para la cogeneración en la industria, especialmente la desalinización de agua.

En la Figura 48 se puede apreciar la configuración típica de un PWR, que fuera explicada en el capítulo 5.3, mientras que la Figura 49 representa el reactor CAREM. Estas dos imágenes permiten distinguir con facilidad las características principales del CAREM. Principalmente, se destaca el hecho de que la central argentina cuenta con el circuito primario integrado, es decir que todo el circuito primario se encuentra dentro del Recipiente de Presión del Reactor (RPR), o vasija del reactor. El circuito primario está compuesto por el núcleo, generadores de vapor, presurizador y mecanismos de control y, el hecho de que se encuentre integrado, elimina componentes tales como el presurizador externo, bombas del circuito primario, generadores de vapor externos y penetraciones al RPR para las barras de control.

El principio básico de funcionamiento es la convección natural del agua del circuito primario. La misma se logra mediante el calentamiento del agua en la parte inferior, donde se aloja el núcleo, generando así que ascienda por fuerza boyante por la chimenea central, ingresando por los laterales a los generadores de vapor por la parte superior. En los mismos, el agua cede calor al circuito secundario por lo que desciende nuevamente hasta llegar al núcleo y cerrar el circuito.

Otra de los aspectos destacados, como se ha mencionado anteriormente, es la autopresurización. La misma se logra mediante un equilibrio dinámico entre el vapor generado y la condensación que se produce en el domo del RPR.

Por último, se ha mencionado que los mecanismos de control se alojan dentro del RPR. Si bien la principal diferencia con un PWR es que estos mecanismos se suelen alojar por afuera, requiriendo penetraciones en el RPR para poder acceder al núcleo en caso de ser necesario, se distingue también el hecho de que en CAREM son de accionamiento hidráulico y no magnético. Esto quiere decir que la posición de las barras se mantiene y regula mediante pulsos de agua y, en caso de ser necesario, caen simplemente por gravedad, sin necesidad de accionamientos eléctricos.

Todo lo presentado hasta este punto determina que el CAREM se presente como un diseño inherentemente más seguro que el de los PWR convencionales, incluso que el de otros SMR tal como se verá más adelante, pues el circuito primario es de alta energía y al disminuir tramos de cañerías, penetraciones al RPR y uniones, se reducen también las posibilidades de fallas.

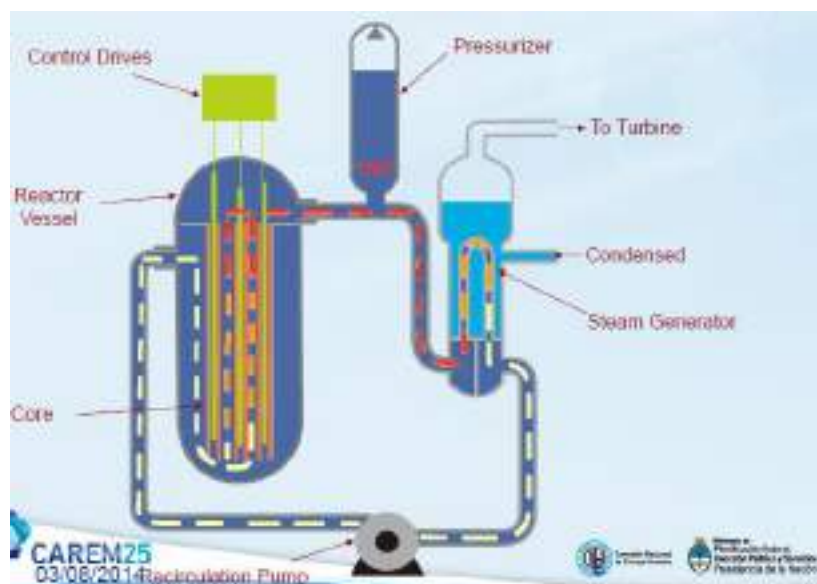


Figura 48 – Configuración típica del circuito primario de un PWR

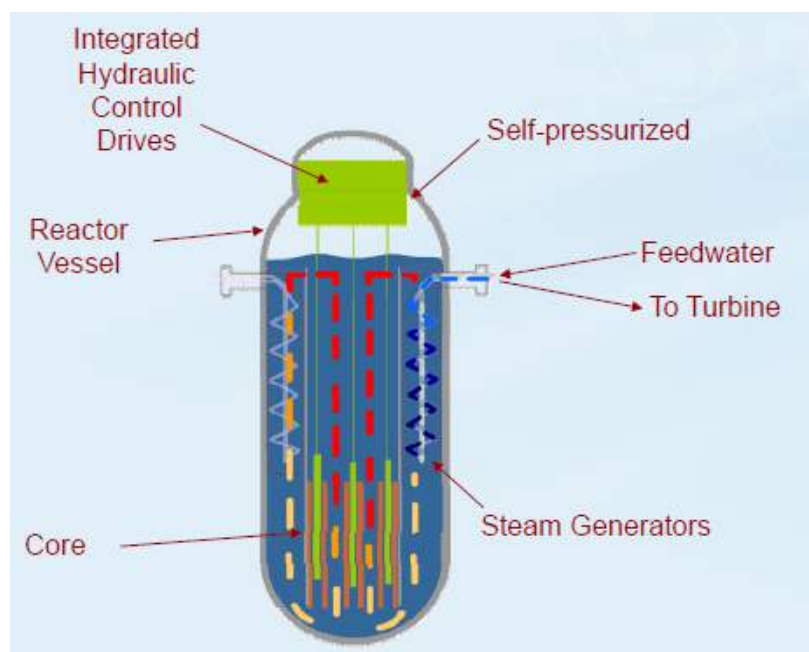


Figura 49 – Configuración del circuito primario del CAREM

Al margen del diseño del circuito primario integrado, el CAREM cuenta con sistemas de seguridad pasivos, que proporcionan 36 horas de período de gracia, lo que quiere decir que, en caso del peor accidente postulado, durante el período de tiempo mencionado se pueden mantener las condiciones del reactor seguro sin necesidad de sistemas eléctricos externos o intervención de operadores. Pasado ese tiempo, se cuenta con sistemas de seguridad activos para extender el período de remoción de calor de decaimiento del núcleo.

En la Figura 50 se puede apreciar la distribución de los sistemas de seguridad con los que cuenta el CAREM, aclarando que los mismos están representados sobre la contención del CAREM25. En primera instancia se destacan los dos sistemas encargados de apagar el reactor, estos son las barras de control y la inyección de agua borada, ambos actúan por gravedad (ver N° 1 y 2 en Figura 50). Por otro lado, en caso de una pérdida total de energía, el calor de decaimiento del núcleo es removido mediante el sistema de extracción de calor residual, que lo

transfiere a la piletta supresora de presión mediante convección natural, es decir principios pasivos (ver N° 5 y 6 en Figura 50). Adicionalmente, si se produce un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA<sup>94</sup>), el sistema de inyección de seguridad evita el descubrimiento del núcleo, también sin requerimiento de energía externa para su accionamiento (ver N° 4 en Figura 50). Como medida de seguridad adicional, el sistema de alivio de presión cuenta con válvulas para proteger la integridad y evitar la falla del RPR (ver N° 7 en Figura 50). Finalmente, debe mencionarse también la contención propiamente dicha, la misma es del tipo supresión de vapor, y está diseñada para que luego de un accidente, aun sin ninguna acción externa, la presión dentro de la contención se mantenga por debajo de la presión de diseño (ver N° 3 en Figura 50).<sup>959697</sup>

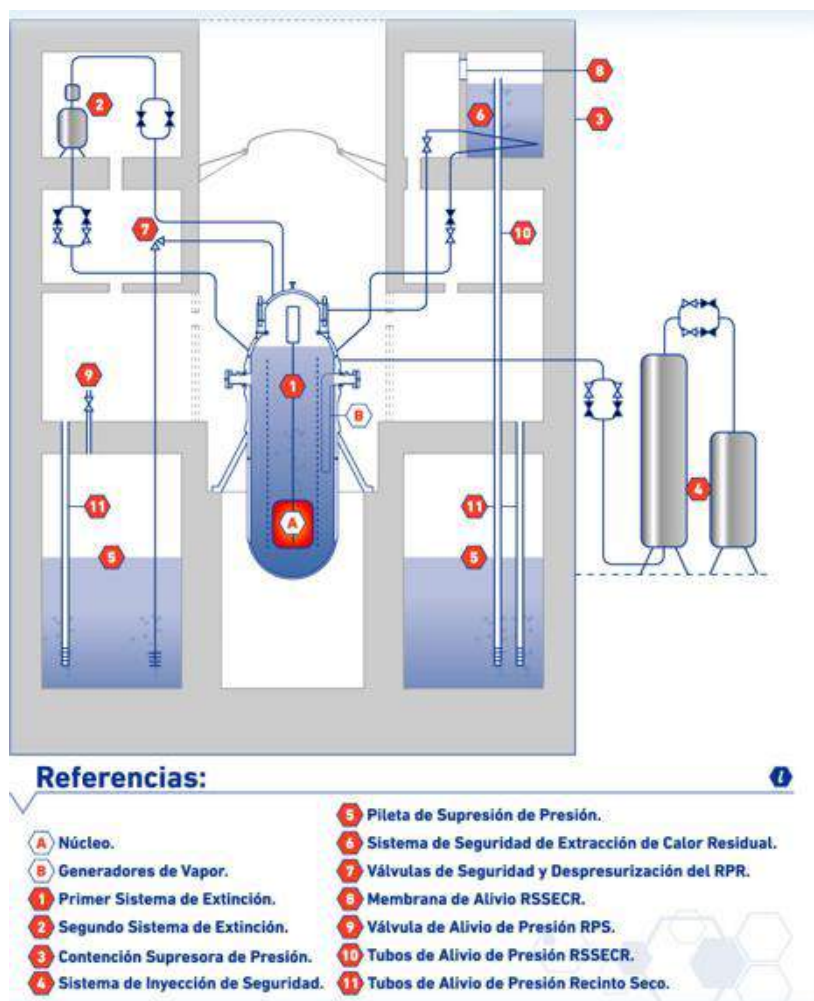


Figura 50 – Sistemas de seguridad del CAREM

<sup>94</sup> LOCA proviene de "Loss of Coolant Accident"

<sup>95</sup>

<sup>96</sup> Delmastro, D., Gómez, S., Mazzi, R, Gómez de Soler, S. et al (2010). *Características Generales del Reactor CAREM25*,(ref.[10]).

<sup>96</sup> Calzetta Larrieu, O. (2014). CAREM Project, presentación realizada en Simposyum Small Modular Reactors For Nuclear Power, Julio 2014, Río de Janeiro, Brasil.[8]

<sup>97</sup> International Atomic Energy Agency (2016). *Advances in Small Modular Reactors Technology Developments*, Edición 2016, Viena, Austria.[36]), p.22.

#### 5.4.2. Prototipo: CAREM25

Si bien el diseño original fue presentado en la década del 80, es recién a partir del año 2006, cuando el Decreto Presidencial 1107/2006 declara la construcción y puesta en marcha del prototipo del Reactor CAREM de interés nacional, que el proyecto ha sido relanzado. Posteriormente, en noviembre del año 2009, la ley nacional 26.566 reafirma el interés declarado en el decreto, asignándole a la CNEA la ejecución del proyecto. De esta forma, el prototipo de 27 MWe ha comenzado su construcción en el año 2014, tomando mayor impulso a partir del año 2017. Si bien los plazos del proyecto están directamente ligados a las partidas presupuestarias que le son asignadas, se espera que la puesta en marcha del CAREM25 se realice en el año 2022.<sup>98</sup> A pesar de esto, si no ocurren imprevistos durante la obra, el CAREM25 será el primer reactor de su tipo en el mundo.

En el caso del CAREM25 el núcleo está compuesto por 61 elementos combustibles, de los cuales 25 cuentan con elementos absorbentes. Cada uno de los elementos combustibles tiene un largo de 1,40m, es de sección hexagonal y cuenta con 127 posiciones de 0,76cm de diámetro (108 barras combustibles, 18 tubos guías para barras de control y un tubo guía para instrumentación), ver Figura 51. Como combustible se utiliza uranio enriquecido, como máximo, al 3,1%, conteniendo una masa total de uranio de 3.960 kg. Con dicha cantidad de combustible, en plena potencia, el reactor alcanza una potencia térmica de 100 MWt.



Figura 51 –Elemento combustible del CAREM



Figura 52 – Render de la Central CAREM25

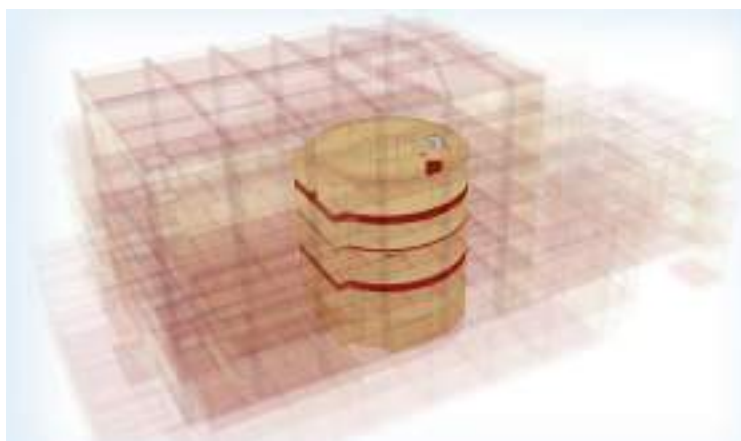
<sup>98</sup> Ibidem.



Se destaca que, a pesar de ser un diseño de los años 80, al ser relanzado el proyecto se han implementado mejoras y adaptaciones al diseño propias de los avances tecnológicos sucedidos durante esos años, y las lecciones aprendidas por Fukushima.

En el prototipo CAREM25 se distingue el hecho de que la central se encuentre integrada mayoritariamente en un único edificio, llamado Edificio del Reactor, que se encuentra dividido en 2 módulos: el módulo de salas de control, vestuarios y oficinas, y el módulo nuclear, donde se encuentra la contención, las piletas de elementos combustibles gastados, y el resto de los sistemas auxiliares. Especialmente, se distingue el hecho de que la contención, de hormigón armado de tabiques de 1,2m de espesor, se encuentre en el interior del Edificio del Reactor, unido monolíticamente a éste (ver la Figura 53). Adicionalmente, y a pesar de estar emplazado en una zona de riesgo sísmico bajo, el CAREM25 ha sido diseñado con un sismo severo, es decir con una probabilidad de ocurrencia de  $3 \cdot 10^{-6}$ , con una aceleración de campo libre (PGA<sup>99</sup>) de 0,25g. Este valor es considerablemente mayor que el establecido por la Autoridad Regulatoria Nuclear de la Argentina (ARN), que establece un período de recurrencia de  $1 \cdot 10^{-3}$ .<sup>100101</sup>

Vale la pena resaltar el hecho de que el CAREM no solo es un diseño de reactor argentino, sino que durante la construcción del prototipo CAREM25 al menos el 70% de los componentes serán de origen nacional. Es decir, que el proyecto representa además un desarrollo considerable para la industria argentina, debido a los elevados estándares de calidad requeridos en los componentes nucleares.



**Figura 53 – Ubicación de la contención en la Central CAREM25**

#### 5.4.3. Versión comercial - CAREM480<sup>102</sup>

Actualmente la CNEA se encuentra trabajando en la ingeniería conceptual de lo que será la versión comercial del reactor argentino, que además de considerarse una potencial fuente de

<sup>99</sup> PGA proviene de las siglas en inglés de Peak Ground Acceleration

<sup>100</sup>

**De Arenaza, I. y Cattaneo J. (2014).** *An overview of the first Argentinean NPP containment design*, artículo presentado en Conferencia TINCE 2014, 1-4 de Septiembre de 2014, París, Francia.[9]

<sup>101</sup> **Autoridad Regulatoria Nacional (2002).** *AR 3.10.1: Protección contra terremotos en reactores nucleares de potencia*, Febrero de 2002. En: [www.arn.gov.ar](http://www.arn.gov.ar)(ref.[5]).

<sup>102</sup> Toda la sección de:

**Gil Posadas, Delmastro D, Di Pace, M, Chocron, M., et al. (2017).** *Central Nuclear CAREM – Escala Comercial*, Revista de la CENA, N° 67-68, Diciembre 2017, Buenos Aires, Argentina.[12], pp.5-16.



exportación para el país, se espera se integre a la matriz energética nacional., Si bien se están analizando distintas configuraciones, la que se encuentra más desarrollada es la denominada CAREM480. A pesar de que el diseño final de la misma estará retroalimentado por las experiencias obtenidas en la construcción y puesta en marcha del CAREM25, la misma tendrá una capacidad de 480MWe, alcanzado mediante 4 reactores de 120MWe cada uno, alojados en su propia contención. La potencia de 120MWe está relacionado con el límite físico en el cual se puede seguir logrando la convección natural para el circuito primario, característica que como se ha mencionado previamente es distintiva del CAREM.

Para materializar la configuración previamente mencionada, se dispondrán 2 edificios nucleares paralelos, cada uno ellos alojarán 2 reactores, con sus respectivas contenciones, una pileta de elementos combustibles gastados y los respectivos sistemas nucleares asociados a cada uno. Entre medio de estos edificios, se ubicará la sala de control principal y secundaria, junto con los servicios auxiliares comunes y el sector de oficinas. Adicionalmente el CAREM480 contará con 2 turbo-generadores, cada uno con la capacidad de recibir el vapor de 2 RPR, de forma de poder realizar una construcción escalonada de la central.

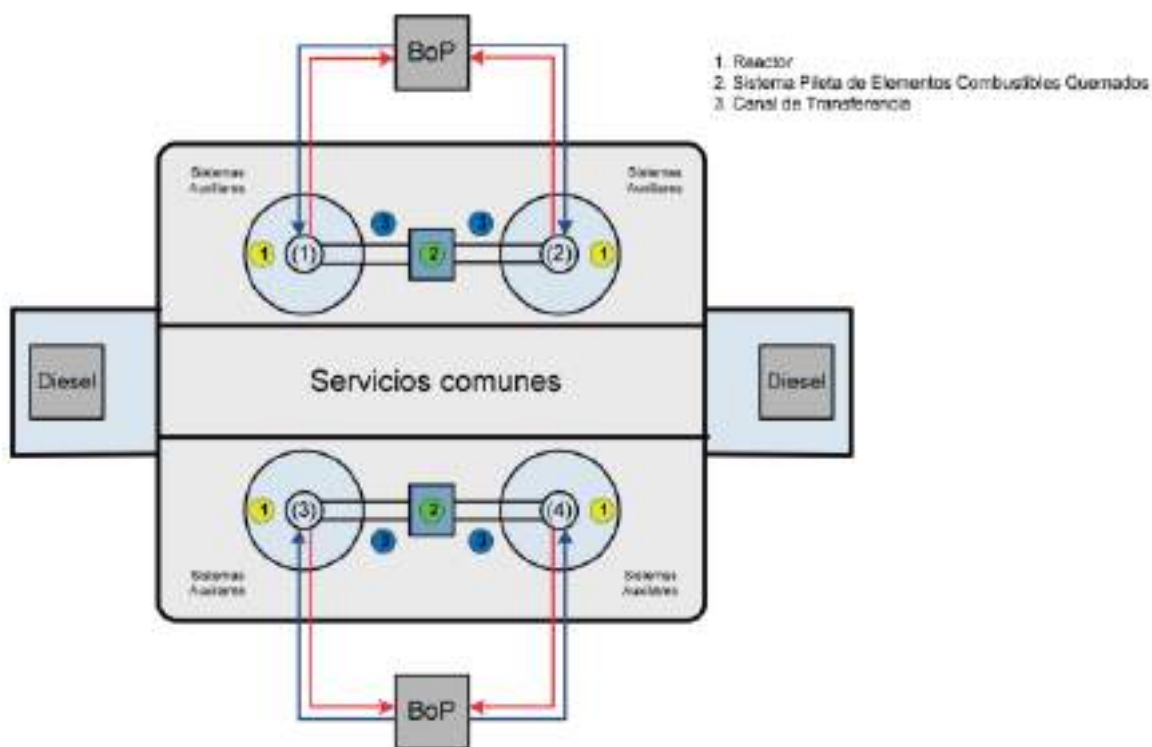


Figura 54 – Layout conceptual del CAREM480

Los sistemas de seguridad del CAREM480 serán similares a los del CAREM25, con la diferencia de que se agrega una Pileta Externa Anular (PEA) a la contención, que actuará como un sumidero final de calor en caso de los accidentes severos postulados. Es decir, que la PEA, en caso de LOCA, absorbe parte de la energía absorbida del calor decaimiento del circuito primario. De esta forma, al tratarse de una pileta externa fácilmente refrigerable, se puede extender el período de gracia.

A diferencia del CAREM25, la versión comercial contará con 157 elementos combustibles en el núcleo.

Respecto a los aspectos económicos, las proyecciones indican que el costo por potencia instalada oscila entre los 4.300 y 4.700 U\$\$/KWe, y el costo nivelado de generación de electricidad de 0,08 a 0,1 U\$\$/KWeh.

## 5.5. SMRs en estado avanzado en otros países

En el presente apartado se desarrollan las características principales de los diseños de SMR que se encuentran en construcción actualmente, a excepción del CAREM que, debido a la importancia que presenta en el desarrollo del presente trabajo, ha sido presentado con mayor detalle en el capítulo anterior. Adicionalmente, se desarrollarán el reactor SMART y NuScale, listados en la Tabla 10, por ser dos de los proyectos más prometedores en SMR, y que adicionalmente se encuentran con fondos suficientes para poder ser ejecutados en el corto plazo.

### 5.5.1. KLT-40S

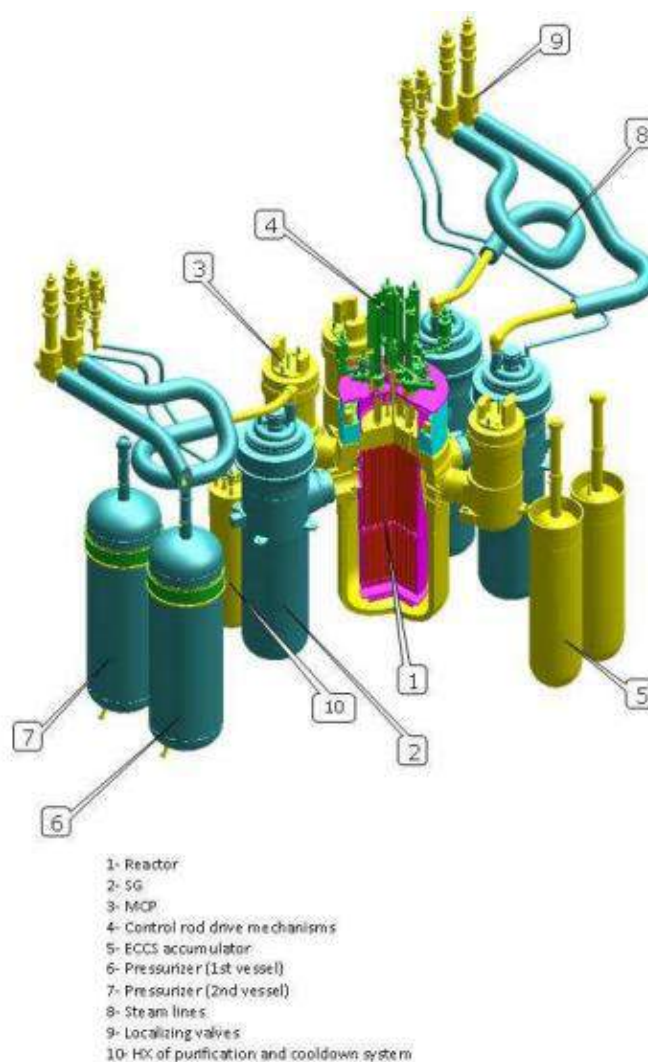
Se trata de un diseño ruso que utiliza un reactor tipo PWR de 35 MWe, con agua liviana como moderador, que presenta la característica de ser una central flotante, y que ha comenzado a construirse en el año 2009. El reactor es una modificación del KLT-40, que ha sido instalado y probado en rompehielos. Se espera que esta central sea apta para diversos usos, tales como la generación eléctrica o desalinización de agua, y se encuentre operativa hacia fin de del año 2019.



Figura 55 – Esquema de planta nuclear alimentada con KLT-40S

En líneas generales la central nuclear está compuesta por la unidad flotante de generación (el reactor propiamente dicho), estructuras de amarre dedicadas, escolleras de protección para minimizar el impacto de las olas, y estructuras auxiliares costeras, para permitir transferir la energía generada. Cada unidad flotante estará equipada con 2 reactores KLT-40S, alcanzando por lo tanto una potencia de 70 MWe.

Respecto al costo de construcción específico se estima en 5.300 U\$S/KWe. Si bien el costo es sustancialmente menor al de un reactor convencional implantado en tierra, debe considerarse que el mismo no contempla todas las edificaciones y sistemas auxiliares que se deben instalar en la costa, ni las obras costeras de abrigo. Por otro lado, el costo de producción de la energía generada será aproximadamente de 0.08 U\$S/KWh.



**Figura 56 – Esquema de reactor KLT-40S**

Las principales características de diseño son:

- Circuito primario con convección forzada para operación normal y circulación natural en caso de emergencia.
- Cuatro generadores de vapor que ingresan en un recipiente de presión en un solo punto.
- Sistemas de seguridad pasivos.
- Núcleo con uranio enriquecido  $U^{235}$  por debajo del 20%. En total está compuesto por 1273 kg de uranio, de los cuales 179 son enriquecidos.
- Potencia térmica generada de 150 MWt.
- Núcleo conformado por 121 elementos combustibles de forma hexagonal.
- Cuenta con 4 presurizadores para mantener la presión del circuito primario.
- Entre 2 y 3 años de operación sin necesidad de recambio de combustibles.
- Recambio de combustibles capaz de ser realizado a bordo.
- Almacenamiento de combustibles gastados a bordo.
- Sistemas de remoción de calor conectados al circuito primario y secundario.
- Si bien la vida útil es de 40 años, cada 12 años el barco debe realizar una inspección intensiva, así como descarga de elementos combustibles gastados.

Respecto al CAREM, el KLT-40S cuenta con la ventaja de ser un diseño que se ha probado en otros usos. Sin embargo, el hecho de que se encuentre montado sobre un barco lo hace competitivo exclusivamente para su uso en zonas costeras, como sería el caso de la desalinización de agua de mar, pero no para ser instalado en el interior del continente. Por otro lado, se puede apreciar que, respecto a los sistemas de seguridad el CAREM es un reactor más evolucionado, con sistemas totalmente pasivos, y por lo tanto más seguro. Adicionalmente, el CAREM cuenta, en su modalidad comercial, con mayor potencia instalada, por lo que podrá abastecer plantas desalinizadoras de mayor capacidad.

El hecho de poder estar operando entre 2 y 3 años sin necesidad de recambio de combustibles es una ventaja de este reactor, sin embargo, cuando el barco debe regresar a la base para el recambio total de los mismos los tiempos improductivos serán mayores que en las paradas del CAREM.

Finalmente, en el plano económico, si bien en el costo por capacidad instalada presentan valores similares, debe considerarse que al valor informado por el KLT-40S debe adicionarse las obras costeras y de abrigo necesarias.<sup>103104105</sup>

#### 5.5.2.RITM-200

Este reactor de 50 MWe, del tipo PWR, surge para reemplazar la serie KLT-40 tanto en rompehielos como en centrales nucleares flotantes. Se espera que para fines del año 2019 se encuentren fabricadas las primeras vasijas del recipiente presión. Respecto a la central en tierra, el cronograma del proyecto indica que el diseño estará finalizado para el año 2020, la construcción comenzará en el año 2022 y la puesta en marcha será para el año 2025.

El costo para este reactor se informa tanto para una central instalada en tierra como para una flotante. En el primer caso el costo específico es de 6.000 U\$/KWe, mientras que en el segundo es de 3.900 U\$/KW. La diferencia radica en que en el caso del flotante no se consideran las estructuras y sistemas costeros. El costo de producción de energía eléctrica varía de 0,095 a 0,062 U\$/KWh respectivamente. Se puede apreciar, por lo tanto, que comparado con el KLT-40S la unidad flotante presenta menor costo de operación, aunque específicamente es más caro.

Respecto al reactor KLT-40S presenta los siguientes cambios:

- Capacidad ser recargado cada 7 años, en vez de 2 o 3. Sin embargo, el recambio de combustibles no se puede hacer en el sitio donde atraca el barco.
- Debido a que el recambio de combustibles se hace en la base, no tiene necesidad de contar con almacenamiento de elementos combustibles gastados.
- Posee 199 elementos combustibles.
- Los 4 generadores de vapor se encuentran ubicados dentro del recipiente de presión.

---

<sup>103</sup> IARIS (ref. [61])

<sup>104</sup> WNA (ref. [78])

<sup>105</sup> **International Atomic Energy Agency (2016). *Advances in Small Modular Reactors Technology Developments*, Edición 2016, Viena, Austria.(ref.[36]), Op. Cit., pp.97-101**

- Contención de 6m x 6m x 15,5m.
- Se agregan sistemas pasivos de reducción de vapor y enfriamiento.

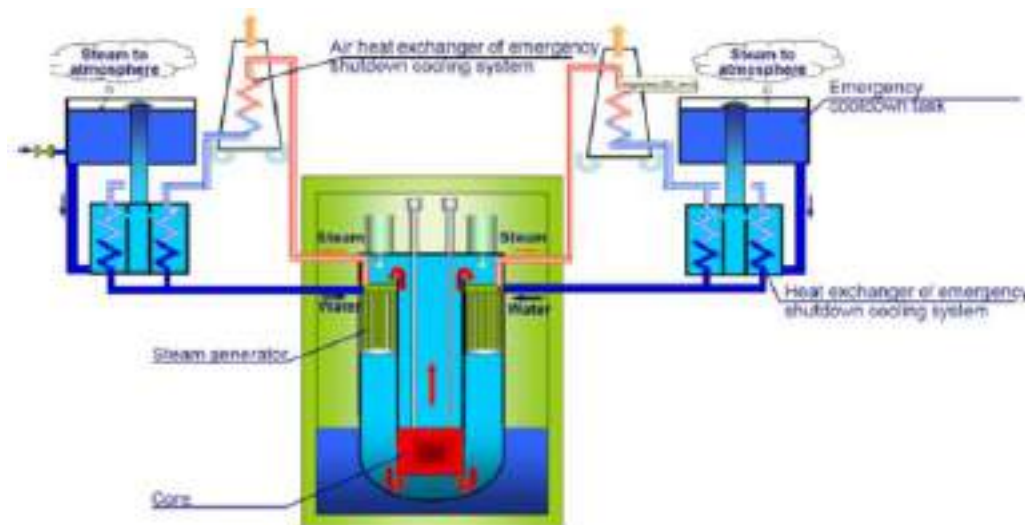


Figura 57 – Esquema de reactor RITM-200

Respecto al CAREM, el RITM-200, y en contrapartida de la comparación realizada con su predecesor, se iguala en condiciones en el hecho de que puede ser instalado en tierra firme. Sin embargo, en este caso los costos informados son un 27% mayores que el reactor argentino. Por otro lado, en cuanto a la potencia total de la central, el CAREM sigue presentando una ventaja, pues cada reactor cuenta con más del doble de capacidad de generación eléctrica.

En cuanto a las medidas de seguridad, el RITM-200 presenta varias ventajas respecto al KLT-40S, aunque respecto al CAREM, al contar con circuitos pasivos y activos y, especialmente con circulación del circuito primario forzada, se presenta como un diseño con mayor cantidad de elementos que potencialmente pueden fallar.<sup>106, 107</sup>

### 5.5.3.HTR-PM

Se trata de una central de cuarta generación de gas refrigerado a alta temperatura (HTGR), que utiliza helio como refrigerante y grafito como moderador. La potencia que alcanza es de 211 MWe, logrados a partir de 2 reactores. Esta central fue diseñada exclusivamente para la generación de energía eléctrica, no siendo posible el uso de la misma para cogeneración, ya sea para desalinización o utilización acoplada a una actividad industrial.

Se destaca que el prototipo de este reactor, llamado HTR-10, fue puesto en funcionamiento en el año 2003. Si bien ya cuenta con un prototipo, el HTR-PM es considerado una prueba de una central de generación, ya que se están diseñando unidades de 600,800 y 1000 MWe acoplados a una sola turbina. Básicamente se trata de unidades modulares del HTR-PM con sistemas relacionados a la seguridad independientes, pero los auxiliares compartidos para lograr reducir costos. El objetivo del HTR-PM, por lo tanto, es demostrar las medidas de seguridad inherentes, la

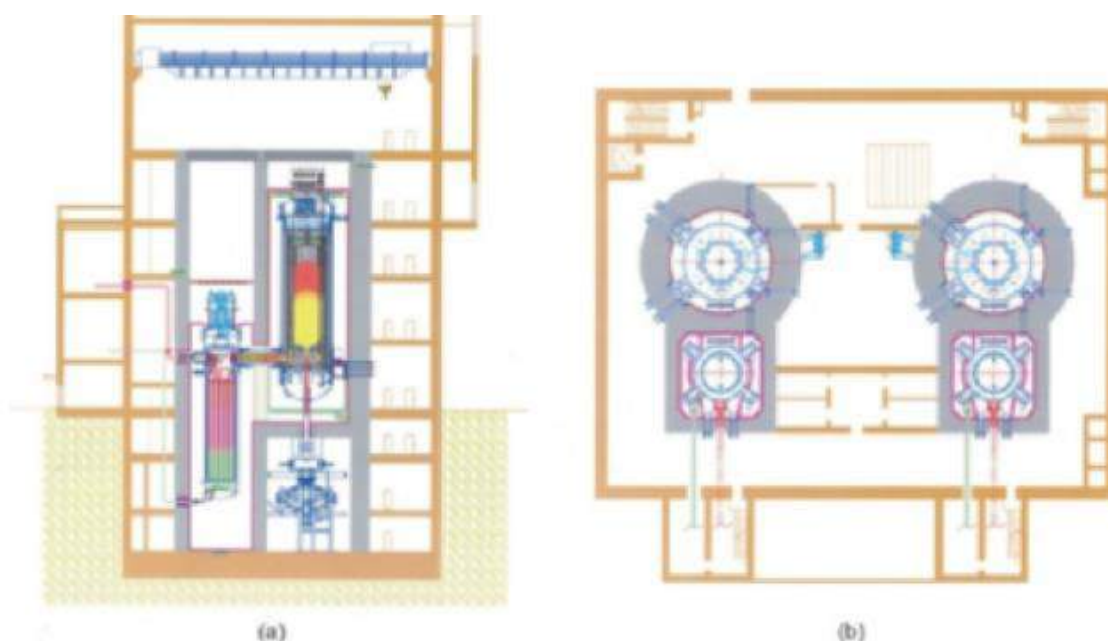
<sup>106</sup> Ibídem, pp.101-04

<sup>107</sup> IARIS (ref. [61])

competitividad del costo, así como alcanzar la estandarización y modularidad. En cuanto al estado del proyecto, se espera que para finales del año 2018 se encuentre en operación.

El costo específico para este reactor se estima en 1.500 U\$/KWe, con un costo de energía generada de 0,05 U\$/KWh. Estos valores, sensiblemente menores a los informados por los SMRs rusos presentados anteriormente, se deben al hecho de que se pueden instalar de forma modular varios reactores HTR-PM, bajando así los costos específicos.

Cada una de las unidades que conforman el HTR-PM consta de un recipiente de presión, un generador de presión y un soplador de helio.



**Figura 58 – Esquema del HTR-PM: a) Corte transversal. b) Vista en planta**

Las principales características de diseño son:

- Combustible 8.5% enriquecido.
- Vida útil de 40 años.
- Convección forzada del circuito primario.
- El núcleo tiene 11m de alto, por 3m de diámetros, y se encuentran alojados en un recipiente de presión de 25m de alto, y 5,7m de diámetro.
- 420.000 elementos combustibles de forma esférica de 6 cm de diámetro en cada recipiente de presión.
- Carga de combustible de forma continua, al igual que la descarga. Es decir, dichas maniobras se realizan durante la operación normal de la central.
- Medidas de seguridad pasivas, de forma de no necesitar medios de remoción de calor activos en caso de accidente.
- En caso de un accidente de pérdida de refrigerante, el aumento de la temperatura de los elementos combustibles es muy lento debido a la inercia térmica del grafito moderador.



El HTR-PM y el CAREM no son competencia en una amplia gama del potencial mercado de los SMR, probablemente en la que mayor expectativa de comercialización tiene el reactor argentino, que es la cogeneración y usos distintos a la generación eléctrica. Sin embargo, en cuanto a la electricidad, el reactor chino presenta la ventaja de estar en una fase del proyecto más avanzada, próxima a la puesta en marcha de su planta piloto.

De todas formas, en lo que a la seguridad respecta, si bien ambos reactores cuentan con sistemas de seguridad pasivos para la remoción del calor residual el hecho de contar con el circuito primario con circulación forzada hace que, en ese aspecto, el reactor chino sea menos confiable que el CAREM.<sup>108109</sup>

#### 5.5.4.ACPR50S

Se trata de una central flotante china de tercera generación de 60MWe de potencia, del tipo PWR, que utiliza agua liviana como refrigerante y moderador. Es un reactor multipropósito, por lo que está diseñado tanto para la generación eléctrica y la cogeneración como, por ejemplo, con plantas desalinizadoras de agua. Al contar con 2 módulos de provisión de energía, puede realizar las actividades mencionadas anteriormente en simultáneo, es decir, una fracción de energía eléctrica y otra acoplada para la desalinización. En el año 2017 ha comenzado la construcción de la central, y se espera que se encuentre conectada a la red en el año 2020.

El costo específico para este reactor se estima en 7.900 U\$/KWe, con un costo de energía generada de 0,19 U\$/KWh.

El reactor consta esencialmente del recipiente de presión, donde se aloja el núcleo, 2 generadores de vapor, 2 bombas principales y 1 presurizador, tal como se puede observar en la Figura 59.

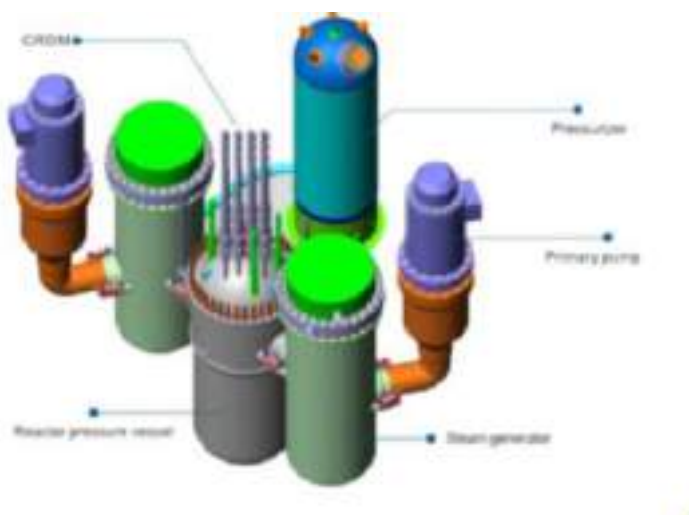


Figura 59 – Esquema del Reactor ACPR50S

<sup>108</sup> *Ibidem*.

<sup>109</sup> **International Atomic Energy Agency (2016). *Advances in Small Modular Reactors Technology Developments*, Edición 2016, Viena, Austria.(ref.[36]), Op. Cit., pp.115-17**



Las principales características de diseño son:

- Circulación del circuito primario por convección forzada.
- Ciclos de operación de 30 meses, con parada de recambio de combustible cada 30 meses.
- Elementos combustibles de uranio enriquecido al 5%.
- El núcleo del reactor cuenta con 37 elementos combustibles, de 2,2m de largo cada uno.
- El recipiente de presión (RPR) se encuentra por debajo de la línea de flotación del barco. De esta forma, se utiliza el agua como blindaje, y como último elemento de defensa en profundidad, en caso de necesitar inundar el RPR en caso de accidente.
- El barco está diseñado para soportar condiciones extremas tales como tifones, tsunamis y choque con otros barcos.
- Cuenta con sistemas pasivos de seguridad tales como el sistema de inyección pasivo, sistema de despresurización automática, sistema pasivo de remoción de calor del circuito secundario, sistema de supresión de presión de la contención, entre otros.

El ACPR50S presenta menor potencia eléctrica que el CAREM, en su versión comercial. Por otro lado, a diferencia del reactor argentino, cuenta con presurizadores y bombas de circulación del circuito primario y, tal como se ha comparado en los otros diseños de SMR desarrollados, eso lo convierte en un diseño que presenta menor grado de seguridad.

Por otro lado, el hecho de que el ACPR50S esté diseñado como un reactor montado en un barco, no lo hace apto para ser instalado tierra adentro, como sí es el caso del CAREM. Finalmente, en cuanto lo económico, el costo específico por KWe instalado declarado es mayor que el del CAREM.<sup>110</sup>

#### 5.5.5.SMART

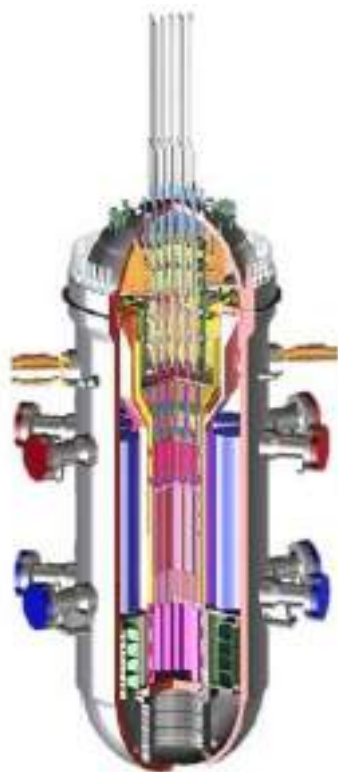
El SMART es un reactor PWR integrado de 100 MWe de capacidad de generación, que utiliza agua liviana como moderador y refrigerante, y que presenta en su diseño conceptos innovadores apuntados a aumentar la seguridad y reducir los costos de generación. El SMART es un reactor multipropósito, es decir que está diseñado tanto para la generación eléctrica como desalinización de agua, cogeneración industrial, etc.

Actualmente el proyecto se encuentra con el diseño certificado, y en septiembre del año 2015 se ha firmado un convenio entre Corea del Sur y Arabia Saudita para la construcción del primer SMART en el golfo pérsico, y se espera que la construcción demore 3 años a partir de la primera hormigonada.

Si bien aún no se han publicado estimaciones de costos de operación del SMART, se destaca que el diseño tiene como objetivo lograr reducciones de costos respecto a otros reactores. Se espera que esto sea logrado mediante la simplificación de sistemas, reducción de tiempos de construcción y alta disponibilidad del reactor en operación.

---

<sup>110</sup> *Ibíd.*, pp. 89-93.



**Figura 60 – Recipiente de presión del SMART**

Las principales características de diseño son:

- Circuito primario integrado, aunque con circulación por convección forzada. Solo bajo condiciones de emergencia el reactor tiene capacidad para lograr convección natural.
- Potencia térmica de 330 MWt.
- El PRV es autopresurizado y contiene los 8 generadores de vapor integrados, así como las 4 bombas de circulación de agua del circuito primario, y las barras de control.
- Posee 57 elementos combustibles de 2 m de largo, con barras rellenas de pellets de dióxido de uranio, con un enriquecimiento menor al 5%.
- Ciclo de combustible de 36 meses.
- Vida útil de 60 años.
- Sistemas de seguridad pasivos compuestos por: sistema de extinción rápida. sistema de inyección de boro, sistema de remoción de calor y contención de presión.

Se puede apreciar que el SMART presenta muchas similitudes con el CAREM, especialmente en cuanto a las medidas de seguridad pasivas de cada uno, la potencia eléctrica alcanzada por cada módulo, comparado con el CAREM comercial, y la forma del recipiente de presión. Sin embargo, la principal diferencia es que el CAREM presenta el circuito primario con convección natural, lo que lo hace más confiable y reduce la probabilidad de fallas en el mismo.<sup>111</sup>

<sup>111</sup> *Ibidem*, pp.35-38.

### 5.5.6. NuScale

El NuScale es un reactor PWR integrado de 50 MWe de capacidad de generación, que utiliza agua liviana como moderador y refrigerante. Si bien se trata de un reactor pequeño, puede ser escalable y en un mismo edificio pueden instalarse hasta 12 módulos para alcanzar los 600 MWe, que de hecho es la configuración que se encuentra en proceso de licenciamiento. Cada módulo es autocontenido, por lo que puede trabajar de forma independiente de los restantes, siendo todos los módulos operados desde la misma sala de control. El NuScale tiene como objetivo tanto la generación eléctrica como la generación de calor para aplicaciones no eléctricas.

Actualmente el proyecto se encuentra en el proceso de certificación de diseño por parte de la autoridad regulatoria de los Estados Unidos. Se espera que el proceso de certificación finalice en el año 2022 y para el año 2026 se encuentre en operación el primer NuScale comercial, en Idaho USA.

No hay estimaciones publicadas respecto a los costos de producción del NuScale.



**Figura 61 – Módulo de NuScale**

Las principales características de diseño son:

- Circuito primario con convección natural.
- Potencia térmica de cada módulo de 160 MWt.
- El PRV es autopresurizado y contiene 2 generadores de vapor integrados, así como las barras de control, y se encuentra alojado dentro de una contención cilíndrica que a su vez descansa en la piletta del reactor. (ver Figura 61 y Figura 62)
- Posee 37 elementos combustible, con barras rellenas de pellets de dióxido de uranio, con un enriquecimiento menor al 4,95%.

- Ciclo de combustible de 24 meses. Sin embargo, permite el recambio de combustibles de un módulo en la pileta del reactor, mientras los otros siguen operando.
- Vida útil de 60 años.
- Debido al diseño de cada módulo sumergido en una pileta, presenta tiempo ilimitado de período de gracia sin la necesidad de la utilización de medios activos de remoción de calor, ni accionamiento de los operarios, ni reposición del inventario de agua.
- RPV de 17,8 m de alto y 3 m de diámetro, dentro de una contención metálica de 23,1 m de alto y 4,5 m de diámetro.
- Cada módulo se encuentra conectado a un conjunto turbina – generador exclusivo.
- Cada módulo cuenta con sistemas de seguridad propios, que son redundados y pasivos.

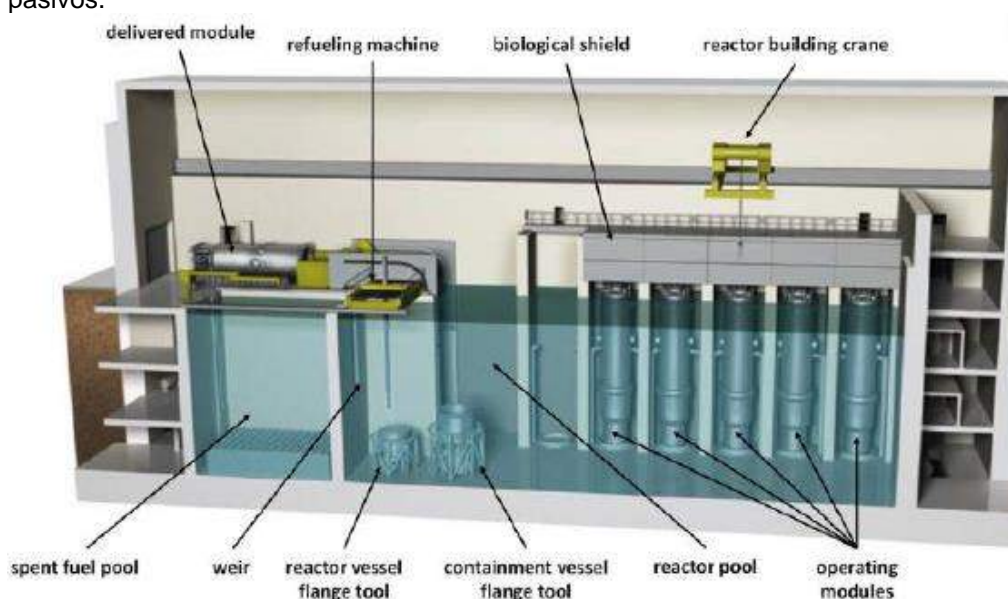


Figura 62 – Corte longitudinal de una Central NuScale

El NuScale presenta características y un diseño innovador que difieren considerablemente del CAREM. Sin embargo, las principales ventajas provistas por sus sistemas de seguridad pasiva, aún deben ser validadas.<sup>112</sup>

<sup>112</sup> *Ibíd*em, pp.73-79.

## 6 DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD TÉCNICA

### 6.1. Introducción

En los capítulos anteriores se ha desarrollado, tanto en la actualidad como a futuro, la problemática del agua en los EAU, país seleccionado para el desarrollo de la presente tesis, (ver 3.1.5), así como su situación energética (ver 3.2) y, más específicamente, el plan nuclear con el que cuenta. Por otro lado, en el capítulo 4, se han comparado las distintas tecnologías existentes para la desalinización de agua a escala industrial, analizando también las que se encontraban en funcionamiento y proyectadas en los EAU (ver 4.3). Por último, en el capítulo 5.4, se han analizado las características técnicas del reactor CAREM, destacando entre ellas el hecho de servir como fuente energética para proyectos de cogeneración.

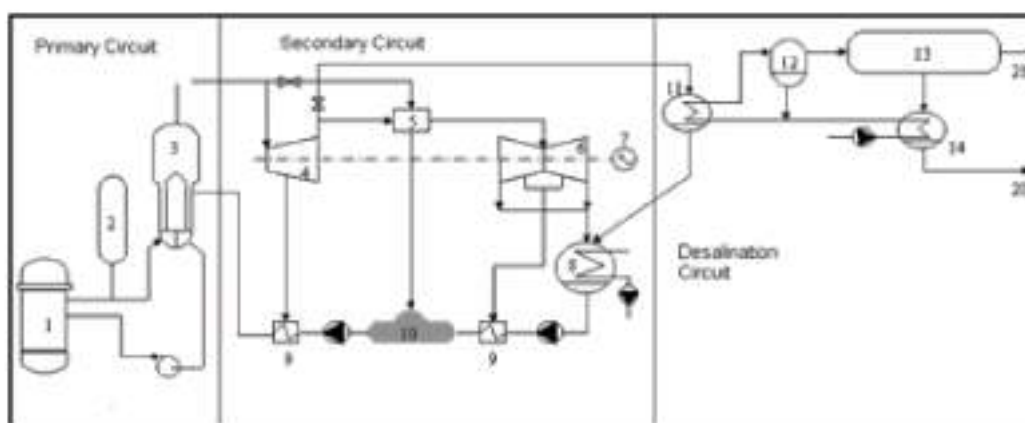
En el presente capítulo, relacionando los conceptos mencionados anteriormente, se buscará determinar si el reactor CAREM es factible de ser utilizado para proveer energía a un proceso de desalinización de agua en los EAU.

### 6.2. Desalinización nuclear

#### 6.2.1. Concepto

De acuerdo a la IAEA, se considera desalinización nuclear a la obtención de agua potable a partir de agua salada, en un proceso donde la fuente de energía, eléctrica o térmica, sea provista por un reactor nuclear. Ya sea que el reactor funciona de forma dedicada para la planta desalinizadora, o aporta una proporción de la energía generada, es importante que ambos estén en el mismo sitio y que puedan compartir algunos elementos tales como personal, sistemas de control, obras de toma y descarga de agua, etc.<sup>113</sup>

Si bien será desarrollado posteriormente con mayor profundidad, en la Figura 63 puede apreciarse un esquema simplificado típico del acoplamiento entre un reactor nuclear y una planta de desalinización del tipo MED. En este caso, se observa que se extrae el vapor a la salida de la turbina (4) y se lleva a un intercambiador de calor de la planta desalinizadora (11). Posteriormente, el condensado vuelve hacia el circuito secundario (8) para reiniciar el proceso.



1: Reactor core, 2: Pressurizer, 3: Steam generator, 4: High pressure turbine, 5: Intermediate steam heater, 6: Low-pressure turbine, 7: Generator, 8: Multi condenser, 9: Pre-heaters, 10: De-aerator, 11: Seawater heater, 12: Flash tank, 13: MED plant, 14: MED output condenser, 20: Fresh water out, 21: Brine out-fall.

Figura 63 –Acoplamiento típico entre un reactor nuclear y una planta MED

<sup>113</sup> International Atomic Energy Agency (2000). *Introduction of Nuclear Desalination*, IAEA-TRS 400, Viena, Austria.(ref.[22]), Op. Cit., p.27

El uso de energía nuclear para la desalinización presenta varias ventajas:

- Es competitiva económicamente con el uso de energía fósil, como será desarrollado en el capítulo 7.
- Los reactores proveen vapor en diferentes rangos de temperatura, lo que permite que se adapten a distintos procesos de desalinización.
- Ante un proceso de energía energéticamente, como es la desalinización, proveen energía limpia, a diferencia de los combustibles fósiles, minimizando el impacto ambiental.<sup>114</sup>

Respecto al impacto ambiental, si bien será desarrollado en el capítulo 8, estudios demuestran que, en el futuro, exclusivamente para la zona del Mediterráneo, se necesitará una producción adicional de 10 millones de m<sup>3</sup>/día de agua dulce. Si dicha producción se alimentara con energía nuclear, en lugar de fósil, el medio ambiente percibiría 200 millones de t/año menos de CO<sub>2</sub>, 200 mil ton/año menos de SO<sub>2</sub> y 60 mil ton/año menos de NO<sub>x</sub>

### 6.2.2. Status y proyección de la desalinización nuclear

A mediados de la década del 60 comenzó a analizarse la posibilidad de acoplar reactores nucleares a plantas de desalinización de agua. De esta forma, en el año 1973 al entrar en operación el reactor BN-350, del tipo LMFBR, en Kazajistán, se convirtió en el primer reactor en suministrar electricidad y calor para la producción de agua potable, para una unidad MED y otra MSF, con una capacidad de tratamiento de agua de 80.000 m<sup>3</sup>/día. Dicha central permaneció en operación hasta mediados de la década del 90. Por otro lado, en 10 de las centrales nucleares en operación en Japón se utiliza la desalinización de agua de mar para obtener agua de alta calidad para los procesos industriales propios del reactor, así como agua potable para consumos propios. La primera de las centrales japonesas en acoplar una planta desalinizadora al reactor fue Ohi, en el año 1978, con una capacidad de producción de agua de 1.300 m<sup>3</sup>/día. Desde entonces otras 9 plantas han realizado el mismo proceso, siempre con capacidades de desalinización acotadas entre 1.000 y 2.600 m<sup>3</sup>/día, para plantas MSF, MED y RO. Adicionalmente, se han instalado plantas desalinizadoras pequeñas en rompehielos nucleares rusos, para alimentar consumos propios de los barcos.<sup>115,116</sup>

Posteriormente, en el año 1989, la IAEA ha impulsado nuevamente el tema en cuestión mediante la redacción de diversos documentos técnicos respecto a la desalinización nuclear y, más precisamente, en el año 1996 crea el Grupo Internacional Asesor de la Desalinización Nuclear (INDAG<sup>117</sup>) con el objeto de asesorar a los países miembros en el lanzamiento de proyectos de demostración de este tipo de desalinización. Adicionalmente, el INDAG ha participado en la publicación de numerosos trabajos, guías y reportes que desarrollan tanto el aspecto técnico, como el económico y ambiental.

En el año 2002 la India ha puesto en funcionamiento un proyecto de desalinización nuclear de demostración híbrido en la central atómica Madras. La planta cuenta con un módulo de RO de 1.800 m<sup>3</sup>/día capacidad y otro de MSF de 4.500 m<sup>3</sup>/día que se alimentan de un reactor PHWR de

---

<sup>114</sup> International Atomic Energy Agency (2007). *Status of Nuclear Desalination in IAEA Member States*, IAEA-TECDOC 1524, Viena, Austria.(ref.[28]), p.5

<sup>115</sup> International Atomic Energy Agency (2000). *Introduction of Nuclear Desalination*, IAEA-TRS 400, Viena, Austria.(ref.[22]), pp.86-90.

<sup>116</sup> WNA (ref. [78]): <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-desalination.aspx> (acceso 02/12/2018)

<sup>117</sup> INDAG proviene de las siglas en inglés de International Nuclear Desalination Advisory Group

170 MWe<sup>118</sup>. Por otro lado, en el año 2009 se puso en operación una planta de MVC de 10.200 m<sup>3</sup>/día, en la central nuclear de Kudankulam, también en India, que provee agua para el circuito primario y secundario, así como agua potable para los pueblos cercanos. Adicionalmente, desde el año 2010 la central rusa del Volgodonsk ha producido agua de reposición con una planta MED de 9.600 m<sup>3</sup>/día. En el año 2010 Pakistán puso en marcha una planta MED de 4.800 m<sup>3</sup>/día acoplada a la central nuclear Karachi, una unidad KANUPP-1 de 125 MWe.

En el año 2011, el INDAG se ha transformado en el Grupo de Trabajo Técnico de Desalinización Nuclear (TWG-ND<sup>119</sup>) que ha continuado con la promoción, estudio y desarrollo del tema, especialmente generando herramientas de software como el DEEP, capaz de realizar la evaluación económica de la desalinización utilizando energía nuclear con distintas configuraciones de plantas, según el combustible utilizado, y el DE-TOP para el estudio termodinámico del acoplamiento de reactores a plantas desalinizadoras. Vale la pena destacar que, tanto en el TWG-ND, así como en su momento en el INDAG, la Argentina forma parte como estado miembro lo que demuestra el interés que desde un comienzo ha generado en el país el tema en cuestión.

Al margen de las plantas de desalinización nuclear que ya se encuentran en operación, hay muchos proyectos que tienen como objetivo la implementación de esta forma de tratamiento de agua. Tal es el caso de Egipto, que planea una central nuclear de 2 reactores en El-Dabaa, a 290 km del Cairo, con una capacidad de generación total de 1190 MWe. Sin embargo, debido a los 432 MWt que utilizará la planta híbrida (MED+RO) de desalinización, quedarán disponibles 1050 MWe, y se espera producir 170.000 m<sup>3</sup>/día a un costo menor a 1U\$/m<sup>3</sup>. Por otro lado, se ha firmado en agosto del año 2017 un acuerdo de cooperación entre Arabia Saudita y China para el desarrollo de proyectos de desalinización utilizando reactores del tipo HTGR. Finalmente existen diversos estudios de factibilidad siendo llevados a cabo por Rusia y los Estados Unidos para implementar plantas desalinizadoras en reactores nucleares existentes de elevada potencia.

Los proyectos mencionados anteriormente, además de vincularse con las principales tecnologías de desalinización presentadas en el capítulo 4, han suministrado valiosa información respecto a la operación de plantas desalinizadoras acopladas a reactores nucleares, así como la confiabilidad y seguridad de las mismas. De hecho, en todo el tiempo que han operado en esta configuración no se han detectado anomalías ni presencia de elementos radioactivos en el agua tratada.

### 6.2.3.Acoplamiento – Aspectos técnicos

Como se ha mencionado anteriormente el reactor nuclear puede entregar energía a la planta desalinizadora tanto en forma de calor, para procesos térmicos, como MSF y MED, o energía eléctrica para procesos electromecánicos como las bombas de alta energía en una planta RO, o el compresor, en MVC o TVC. Adicionalmente, toda planta desalinizadora tiene consumos de energía eléctrica para el funcionamiento de las bombas, y servicios auxiliares. Por otro lado, el acoplamiento puede ser con un reactor de propósito simple, es decir que toda la energía generada es entregada a la planta desalinizadora, o de cogeneración, en cuyo caso el reactor además de entregar energía para el proceso de desalinización produce energía eléctrica.<sup>120</sup>

### 6.2.4.Acoplamiento a un reactor de potencia de generación eléctrica

En este caso la vinculación es relativamente sencilla, pues solo requiere de conexión eléctrica y, por lo tanto, la interdependencia entre ambos procesos es pequeña, lo que genera que

<sup>118</sup> **International Atomic Energy Agency (2001).** *INDAG Newsletter*, INDAG Newsletter N°1, Viena, Austria.(ref. [24])

<sup>119</sup> TWG-ND proviene de las siglas en inglés de Technical Working Group – Nuclear Desalination

<sup>120</sup> **International Atomic Energy Agency (2000).** *Introduction of Nuclear Desalination*, IAEA-TRS 400, Viena, Austria.(ref.[22]), pp.75-83.



también lo sea el riesgo de contaminación del agua producida. Si bien podría pensarse en que no es necesario que compartan predio, disponer las plantas de forma contigua aporta grandes ventajas. Además de compartir la obra de toma y descarga de agua del mar, personal y algunos servicios auxiliares, la descarga del condensado del circuito terciario, a mayor temperatura que la que es captada del mar, puede ser utilizada para alimentar el proceso de RO. De esta forma aumenta la eficiencia del proceso RO debido a que aumenta el flujo que atraviesa la misma área de membrana.

Si bien representa un reactor de cogeneración, la Figura 64, muestra un esquema de conexionado donde el condensado del circuito terciario del reactor se conecta a una planta RO, para pretratamiento del agua de ingreso, tal como se ha mencionado en el párrafo anterior.

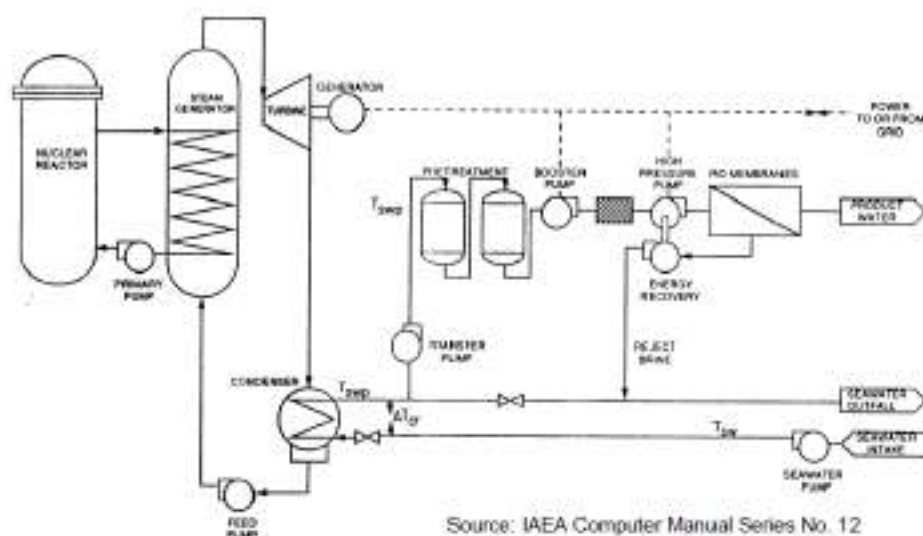


Figura 64 –Acoplamiento eléctrico y térmico con una planta RO<sup>121</sup>

### 6.2.5. Acoplamiento a un reactor de generación de calor

En esta configuración los reactores entregan toda la energía, en forma de vapor o agua caliente al proceso de desalinización, es decir, que no generan energía eléctrica. La energía eléctrica necesaria para los servicios propios y las bombas principales debe ser suministrada por otras fuentes, esencialmente la red eléctrica.

Es deseable que el reactor se ubique cerca de la planta desalinizadora, de forma de minimizar la distancia de cañerías de vinculación y, por lo tanto, las pérdidas de calor y costo de la instalación. Sin embargo, debe considerarse que los procesos de desalinización trabajan con vapor a baja temperatura, máximo a 140°C, para evitar la formación de incrustaciones y corrosión, por lo que las pérdidas de temperatura deben ser tenidas en cuenta a la hora de analizar la factibilidad técnica de acoplamiento de un reactor.

Vale la pena recordar, en este caso, que un reactor PWR normalmente trabaja a una T del orden de 300 °C y a una presión de 15 MPa (en la Figura 64 se puede apreciar la presión y temperatura en cada *loop* del PWR), mientras las plantas desalinizadoras a valores menores, por lo que el acople requiere de un intercambiador de calor.

<sup>121</sup> International Atomic Energy Agency (2001). Safety aspects of nuclear plants coupled with seawater desalination units, IAEA-TECDOC 1235, Viena, Austria.(ref.[23]), p.17

<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html>

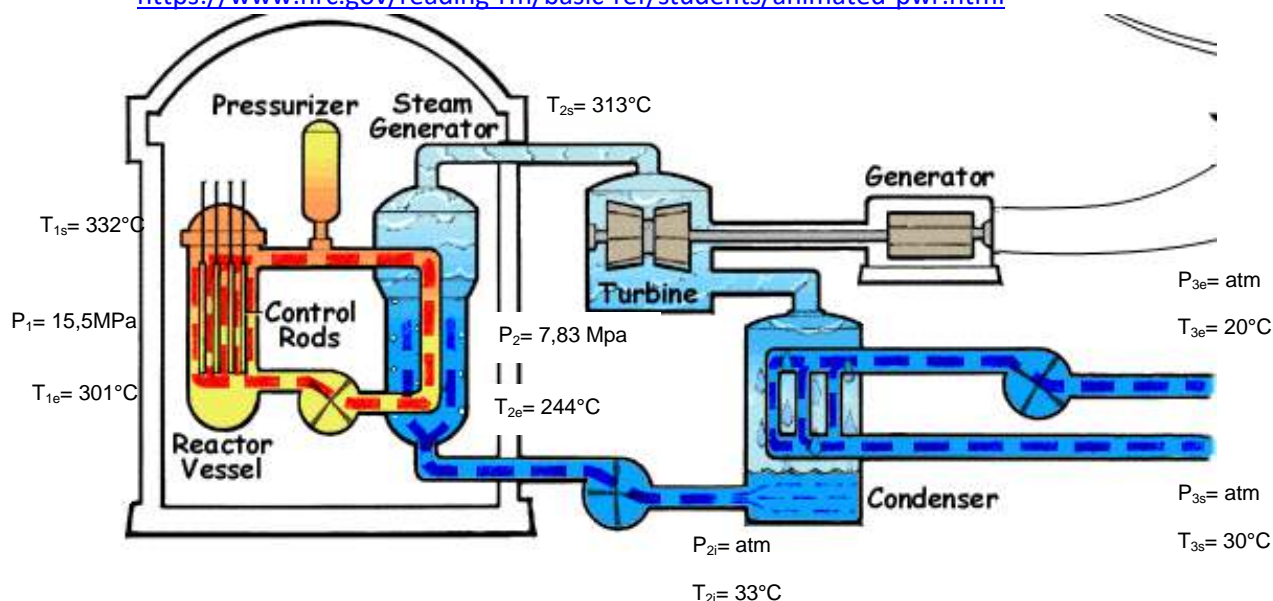


Figura 65 –Esquema de PWR con valores de P y T en cada loop<sup>122</sup>

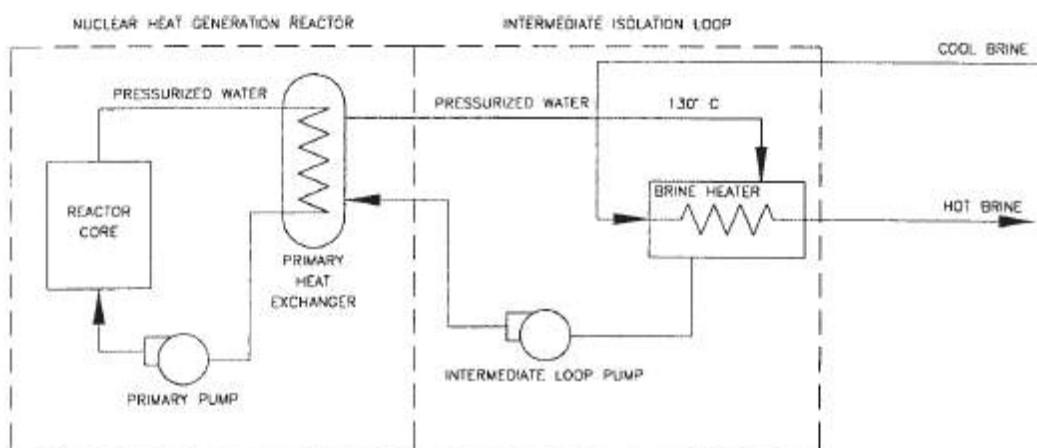
Para este tipo de acoplamiento resultan mejores los reactores del tipo PWR, ver 5.3.2, pues el generador de vapor provee una barrera entre el vapor generado y el circuito primario de refrigeración. Los BWR, ver 5.3.3, no son aconsejables para esta configuración debido a que, por el contrario, el vapor se genera directamente en el núcleo del reactor sin ninguna barrera intermedia, aumentando de esta forma el riesgo de que se produzca contaminación en caso de una rotura de alguna cañería de interconexión.

#### 6.2.5.1. Acoplamiento con una planta MSF

En el caso de las plantas MSF se logran mayores GOR utilizando vapor de baja temperatura, entre  $121^\circ\text{C}$ , para MSF con recirculación, y  $140^\circ\text{C}$ , para MSF de un paso, a una presión entre 2 y 3,7 bar (ver capítulo 4.2.1.1). Sin embargo, utilizar precalentamiento a estas temperaturas aumenta la necesidad de utilizar ácidos en el agua de ingreso para evitar las incrustaciones alcalinas.

En los casos de acoplamiento con una planta MSF se instala un *loop* intermedio de aislación entre el reactor y el proceso de desalinización (ver Figura 66). El mismo actúa como una barrera secundaria pues la corriente de descarga es mantenida a mayor presión que el agua presurizada. Es decir, que en casos de una pérdida el fluido se dirige desde la planta de desalinización y no hacia ella.

<sup>122</sup> NRC; <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html> (acceso el 18/04/2019)

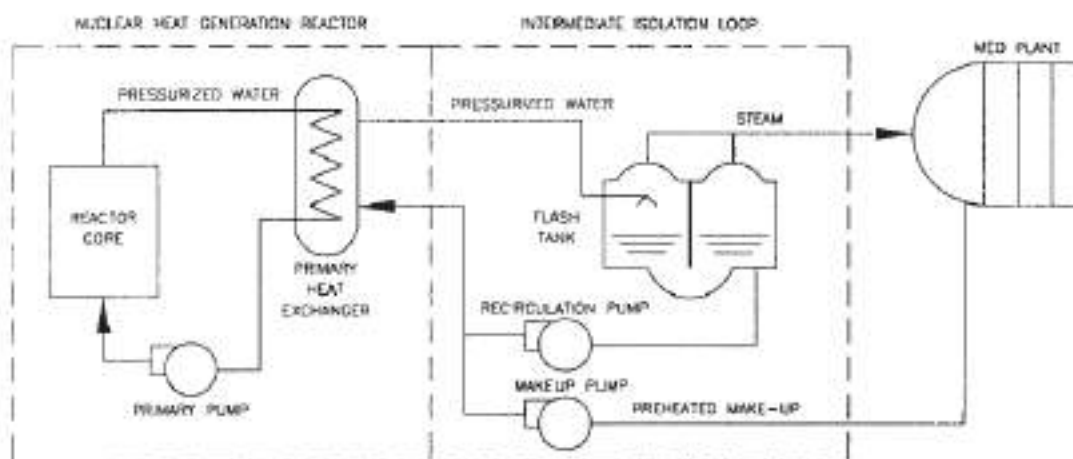


**Figura 66 – Loop intermedio de aislamiento entre el reactor de generación de calor y la planta MSF**

#### 6.2.5.2. Acoplamiento con una planta MED

Se logra mayor eficiencia al acoplar un reactor a una planta MED cuando la presión de vapor se encuentra entre 0,3 y 0,4 bar, a una temperatura entre 69 y 76 °C, es decir, vapor con menos energía que para una planta MSF.

En este caso, el acoplamiento requiere un *loop* intermedio cerrado de agua de alta calidad. En dicho circuito cerrado el vapor es condensado transfiriendo el calor a otro intercambiador de calor, que es el que finalmente calienta el agua a tratar. Si bien este segundo intercambiador puede ser agua presurizada o de agua en ebullición, o tanque *flash*, se suele utilizar la segunda opción debido a que es más económico. Tal es el caso representado en la Figura 67 (ver también referencia 12 en Figura 63).



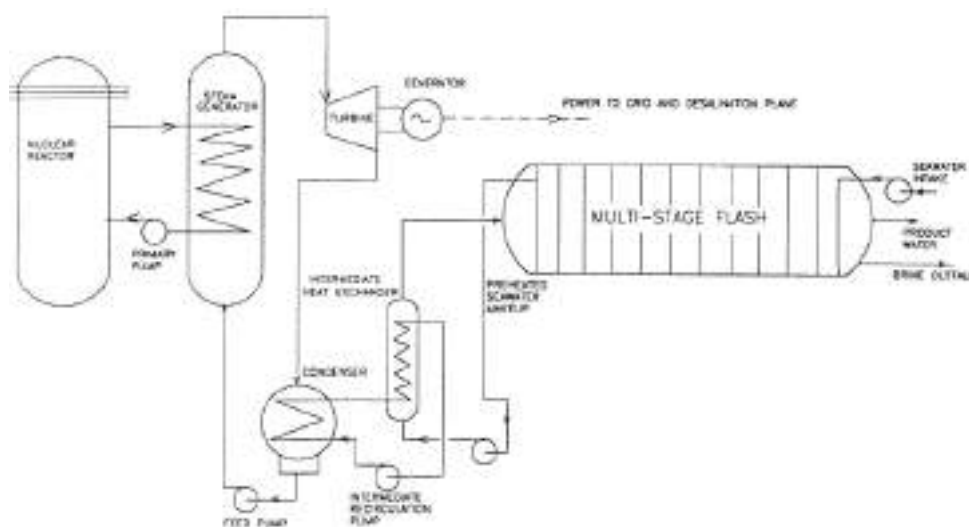
**Figura 67 – Loop intermedio de aislamiento entre el reactor de generación de calor y la planta MED**

#### 6.2.6. Acoplamiento de a un reactor de cogeneración

Existen 2 tipos de configuraciones para el acoplamiento a un reactor de cogeneración: en paralelo o en serie. En la primera, la electricidad se genera en forma simultánea al agua desalinizada. Si bien esta configuración permite mayor flexibilidad en cuanto al uso y despacho de la energía eléctrica, tiene la desventaja de que el consumo total de energía es el mismo que si se produjeran ambos procesos de forma independiente.

Por otro lado, en la cogeneración en serie, se produce primero la electricidad mediante la expansión del vapor en una turbina de contrapresión y posteriormente se alimenta al proceso de desalinización. De esta forma, se reduce el consumo total de energía, en comparación con la cogeneración en paralelo. Esto se debe a que se convierte la mayoría de la entalpía del vapor en energía mecánica / eléctrica, antes de utilizarlo como fluido para calentar. En cada caso, y según las necesidades del proyecto, se debe optimizar la presión de salida de la turbina ya que, a mayor presión aumenta la temperatura disponible para el precalentamiento, pero disminuye la generación de energía eléctrica.

En la Figura 68 se observa el esquema de un reactor de cogeneración acoplado en serie a una planta MSF. Se puede observar que es muy similar al presentado en la Figura 66, con la salvedad de que se instala la turbina para generación eléctrica antes de alimentar el *loop* de aislación.



**Figura 68 – Acoplamiento en serie entre un reactor de cogeneración y una planta MSF**

Debe considerarse que tanto la demanda de agua como de electricidad varía de forma estacional y horaria dentro del mismo día, motivo por lo que la planta debe tener flexibilidad para afectar estas variaciones. Estas fluctuaciones en la demanda producen transitorios en el consumo de vapor, que pueden afectar ambos procesos, el de desalinización y el nuclear. De hecho, las plantas desalinizadoras térmicas son muy sensibles a la variación en la carga. Es decir que, en caso de un aumento en la demanda de energía eléctrica y la reducción del flujo de vapor de precalentamiento, o reducción en la demanda de agua, la reducción de la capacidad momentánea de generación de agua desalinizadora podría generar problemas en los sistemas de la misma. Adicionalmente, los reactores deben funcionar siempre a una potencia estable. Es decir, no pueden ciclar la potencia ni hacer seguimiento de carga. Esto debe ser así, porque de lo contrario el combustible nuclear (las barras de UO<sub>2</sub> con vainas de zircalloy) aumenta mucho la tasa de falla (se producen fisuras en la vaina y éstas pierden estanqueidad). Por tal motivo, se recomienda adoptar una configuración con varios módulos de desalinización en paralelo, de forma de ir sacando de funcionamiento algunos para que los que sigan funcionando lo hagan con la carga adecuada.

Finalmente, debido a que los reactores nucleares tienen periódicamente paradas programadas para el recambio de combustible (paradas de 20 días cada aproximadamente cada 18 meses), se deben prever fuentes de alimentación de vapor y energía eléctrica de back-up, para no tener que parar también la planta desalinizadora. De la misma forma, si la planta desalinizadora se encuentra en mantenimiento, deben preverse condensadores de back-up para la descarga del excedente de vapor.

### 6.2.7. Acoplamiento – Medidas de seguridad

La seguridad, desde el punto de vista radiológico, de una planta de desalinización nuclear depende principalmente de las medidas de seguridad propias del reactor nuclear y de la interfase entre el reactor y la planta de desalinización. En este sentido, debe garantizarse que cualquier variación en el consumo de vapor por parte del proceso de desalinización no genere una situación de riesgo para el reactor. De la misma forma, para el caso de acoplamiento para un proceso RO, debe considerarse que la variación en el consumo eléctrico no afecte la turbina.<sup>123</sup>

Por otro lado, deben tomarse las medidas de seguridad necesarias para evitar la contaminación del agua tratada. Como mínimo, debe haber 2 barreras mecánicas, por ejemplo, el generador de vapor y el condensador de la turbina. Adicionalmente, debe haber presión inversa entre el circuito primario y la corriente de descarga, o salmuera. De esta forma, de existir una pérdida el flujo del líquido no irá hacia la planta desalinizadora, sino que lo hará hacia el reactor. A pesar de esto, debe considerarse que el tamaño que pueden tener los isótopos radioactivos es tal que entre el 91 y 97% de los mismos serían retenidos en las plantas desalinizadoras.<sup>124</sup>

Adicionalmente, debe implementarse un sistema de monitoreo que permita tener información fehaciente de la presencia o no de radioactividad tanto el *loop* intermedio como en el sistema de desalinización propiamente dicho.

Asimismo, debe considerarse también la diferencia entre la vida útil de un reactor nuclear, generalmente mayor a 40 años, y las plantas desalinizadoras, menor a 25 años. Esto requiere que se realice adecuado mantenimiento de todos los componentes para evitar situaciones no previstas que pongan en riesgo al reactor nuclear.

Finalmente, en todo proyecto de desalinización nuclear debe realizarse un estudio probabilístico y determinístico de análisis de riesgo, al igual que se hace con la instalación de una central nuclear sin acoplar. Como prueba del trabajo de la Argentina como miembro de los comités y grupos de trabajo de la IAEA mencionados anteriormente, INVAP ha desarrollado un software, denominado DESNU capaz de realizar dicho análisis para distintas configuraciones de plantas desalinizadoras que se utiliza internacionalmente para estos análisis. De hecho, DESNU ha sido desarrollado en el marco de los estudios preliminares de factibilidad del reactor CAREM para la desalinización nuclear.<sup>125</sup>

## 6.3. Factibilidad técnica de acoplamiento del CAREM a una planta desalinizadora

En la presente sección se describe la factibilidad técnica del acoplamiento del reactor CAREM con diferentes tipos de plantas desalinizadoras de agua.

### 6.3.1. Acoplamiento del CAREM a RO

En la sección 4.3 se ha concluido que a la hora de proyectaren la instalación de una planta de desalinización en los EAU, sería conveniente y lógico utilizar plantas de RO, para continuar con la tendencia de las plantas proyectadas. En el año 2003 fue presentado en Viena, Austria, en el marco de una conferencia de energía nuclear de la IAEA, un trabajo desarrollado por integrantes

---

<sup>123</sup> International Atomic Energy Agency (2007). *Status of Nuclear Desalination in IAEA Member States*, IAEA-TECDOC 1524, Viena, Austria.(ref.[28]), Op. Cit., p.30.

<sup>124</sup> International Atomic Energy Agency (2001). *Safety aspects of nuclear plants coupled with seawater desalination units*, IAEA-TECDOC 1235, Viena, Austria.(ref.[23]), Op. Cit., p.19.

<sup>125</sup> International Atomic Energy Agency (2005). *Optimization of the coupling of nuclear reactors and desalination systems. Final report of a coordinated research Project 1999–2003*, IAEA-TECDOC 1444, Viena, Austria.(ref.[27]), p.128.

de la CNEA respecto a la factibilidad del acoplamiento entre el reactor CAREM y una planta de ósmosis inversa en la localidad de Puerto Deseado, en la Patagonia argentina. Como se ha mencionado en la sección 6.2.4, el acoplamiento a una planta de RO resulta sencilla pues no requiere modificaciones en el reactor, al menos si no se utiliza el agua de descarga del sistema terciario para precalentar el agua de alimentación a la planta RO. De esta forma se ha analizado el acople de un módulo CAREM de 125MWe a plantas RO de 48.000 m<sup>3</sup>/día, 24.000 m<sup>3</sup>/día y 12.000 m<sup>3</sup>/día, comparándolo con realizar el mismo proceso, pero alimentado mediante un Ciclo Combinado (CC) de la misma potencia. Los resultados además de demostrar la factibilidad técnica, arrojan costos levemente menores al obtenido mediante fuentes fósiles. Vale la pena destacar que estas diferentes configuraciones de plantas RO son sencillas de comparar debido a que este tipo de acople permite flexibilidad en cuanto a la disponibilidad de la energía eléctrica, y lo que se modifica en una variante y otra es el excedente de energía eléctrica que se inyecta a la red.<sup>126</sup>

Adicionalmente, también se ha estudiado el acople del CAREM25, es decir el prototipo, a una planta RO mediante la cogeneración. Esta alternativa requiere solo pequeñas modificaciones en el BOP<sup>127</sup>, es decir la parte asociada al conjunto turbina-generador, del CAREM25. Para lograr la factibilidad técnica, respecto a la configuración original del CAREM, solo es necesario modificar la temperatura de salida del condensador a 43,8 °C y la contrapresión de la turbina 0,1238 bar. De esta forma, se puede utilizar el agua de condensado para el precalentamiento del agua de alimentación de hasta 3 módulos de 10.000 m<sup>3</sup>/día cada una (ver Figura 69). Por otro lado, se adiciona una cañería adicional desde la toma de agua de enfriamiento del reactor del circuito terciario, para poder alimentar directamente la planta RO en caso de que la central nuclear se encuentre en mantenimiento. El estudio demuestra que acoplar un solo módulo RO no es tan ventajoso en cuanto la eficiencia global del sistema, es decir reactor nuclear y planta desalinizadora acopladas solo eléctricamente, pues solo se produce una pequeña mejora en la eficiencia. Al acoplar más módulos, los beneficios se hacen cada vez más evidentes, pudiendo el CAREM25 acoplar hasta 10 módulos de 10.000 m<sup>3</sup>/día, dependiendo de la tecnología de membrana utilizada.<sup>128, 129</sup>

En base al estudio anteriormente presentado, extrapolando los resultados para cada módulo del CAREM comercial de 120 MWe, se podrían acoplar hasta 40 módulos de la capacidad mencionada, logrando así abastecer plantas de capacidades similares a las proyectadas en EAU, tal como se describiera en 4.3.

---

<sup>126</sup> **International Atomic Energy Agency (2007).** *Status of Nuclear Desalination in IAEA Member States*, IAEA-TECDOC 1524, Viena, Austria.(ref.[28]), Op. Cit., pp.54-55.

<sup>127</sup> BOP proviene de las siglas en inglés de Balance Of Plant.

<sup>128</sup> **International Atomic Energy Agency (2005).** *Optimization of the coupling of nuclear reactors and desalination systems. Final report of a coordinated research Project 1999–2003*, IAEA-TECDOC 1444, Viena, Austria.(ref.[27]), Op. Cit., pp.92-95.

<sup>129</sup> **International Atomic Energy Agency (2002).** *Status of design concepts of nuclear desalination plants*, IAEA-TECDOC 1326, Viena, Austria.(ref.[25]), Op. Cit., p.161

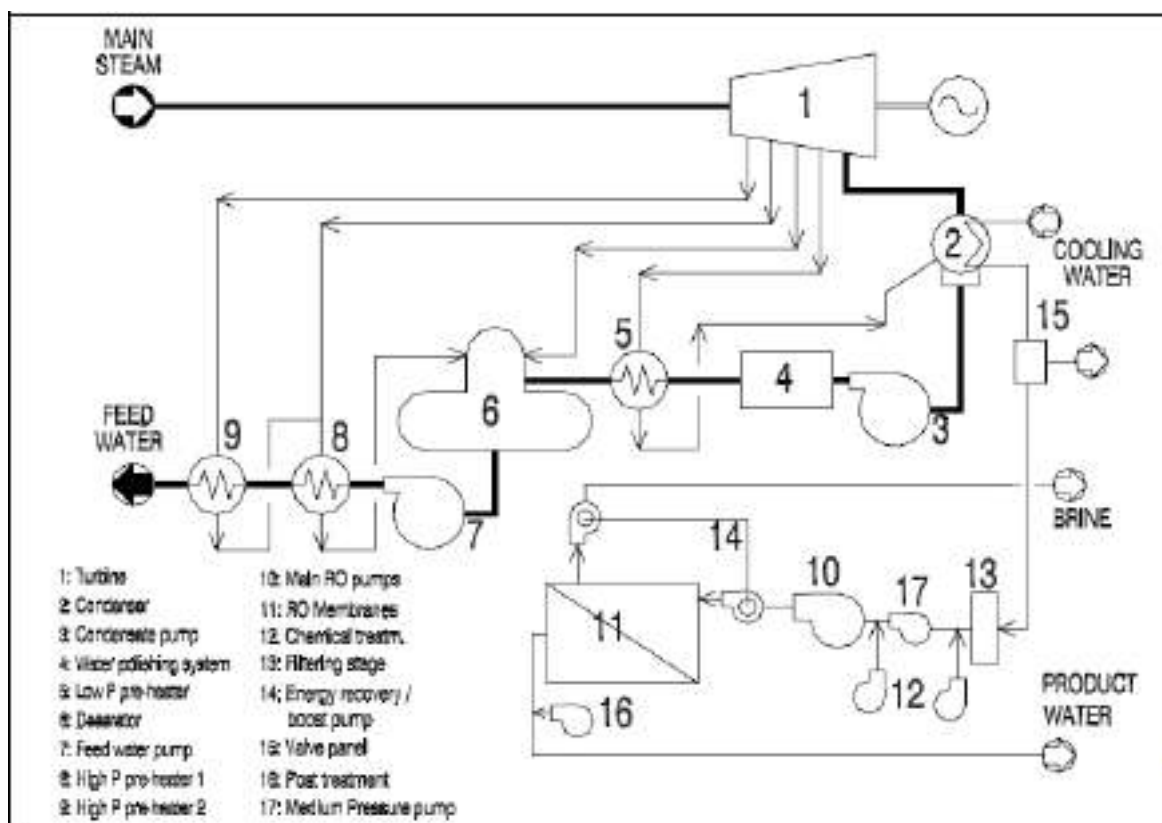


Figura 69 – BOP del CAREM en cogeneración con una planta RO

### 6.3.2. Acoplamiento del CAREM a MSF

Si bien se considera que es técnicamente factible el acoplamiento del reactor CAREM a una planta MSF, debido al cambio de tendencias en cuanto a las tecnologías de desalinización, lo que genera que cada vez se proyecten menos plantas de este tipo, no se ha profundizado mucho en este acople en particular. Sin embargo, tal como fuera presentado en el TECDOC 1444 de la IAEA, INVAP ha realizado modelos conceptuales de una planta genérica de MSF acoplada al CAREM. Los mismos han arrojado resultados preliminares respecto a la forma de acople, especialmente respecto al punto de extracción de vapor para calentar el agua a tratar, así como la presión y temperatura deseada del mismo en este caso 10 bar y 180°C respectivamente. Si bien estos resultados por si solos no permiten garantizar completamente la factibilidad técnica del acoplamiento con el CAREM permiten, en caso de ser necesario, contar con las bases para poder realizar los modelos de detalle con una correcta aproximación.<sup>130</sup>

### 6.3.3. Acoplamiento del CAREM a MED

Como se ha mencionado anteriormente, en este caso el acople consiste en aprovechar el calor que circula en una de las líneas de extracción de la turbina para ser utilizado en el proceso de desalinización como fuente térmica, y en menor medida, la utilización de la energía eléctrica para abastecer los dispositivos de bombeo de la planta desalinizadora. También se ha mencionado que, para evitar el riesgo de contaminación del agua tratada, se instala un *loop*

<sup>130</sup> International Atomic Energy Agency (2005). *Optimization of the coupling of nuclear reactors and desalination systems. Final report of a coordinated research Project 1999–2003*, IAEA-TECDOC 1444, Viena, Austria.(ref.[27]), Op. Cit., pp.91-92



intermedio entre ambos procesos, formando un gradiente de presión inverso al sentido de circulación de calor.<sup>131</sup>

Se han realizado estudios, con resultados positivos, para analizar el acople para el caso del CAREM25 con una planta MED de 6.367 m<sup>3</sup>/día, proyectada con un GOR de 15:1, con el esquema presentado en la Figura 70. Para cada uno de los intercambiadores de calor del *loop* intermedio se ha postulado un salto de 5° C. Conceptualmente el calentador IC1 actúa como un intercambiador de calor, mientras que IC2 lo hace como generador de vapor, pues entrega vapor saturado a 80°C a la planta MED (ver N° 1 en Figura 70). Se ha calculado el Consumo Energético Específico (CEE), que representa el consumo de energía eléctrica consumido para producir 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada, obteniendo 15,1 kWh/m<sup>3</sup>. Dicha variable da una idea de la energía que se deja de entregar a la red por las derivaciones al proceso de desalinización, concluyendo que, en definitiva, la disminución de la producción de energía eléctrica es 3,5 MWe.<sup>132</sup>

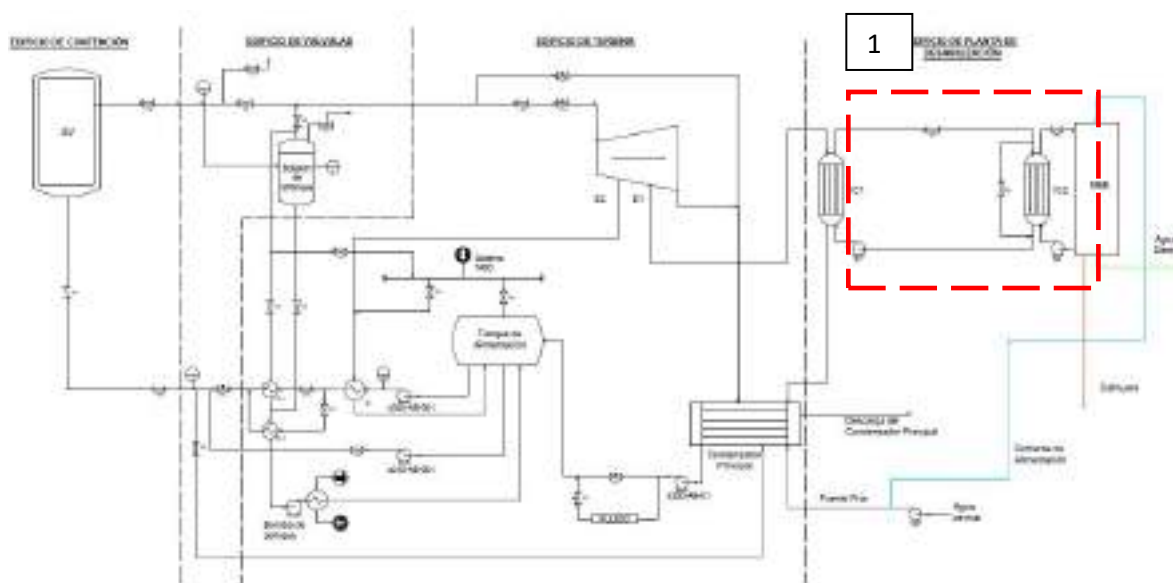


Figura 70 – Esquema de CAREM25 acoplado a una planta MED<sup>133</sup>

#### 6.3.4. Acoplamiento del CAREM a plantas híbridas

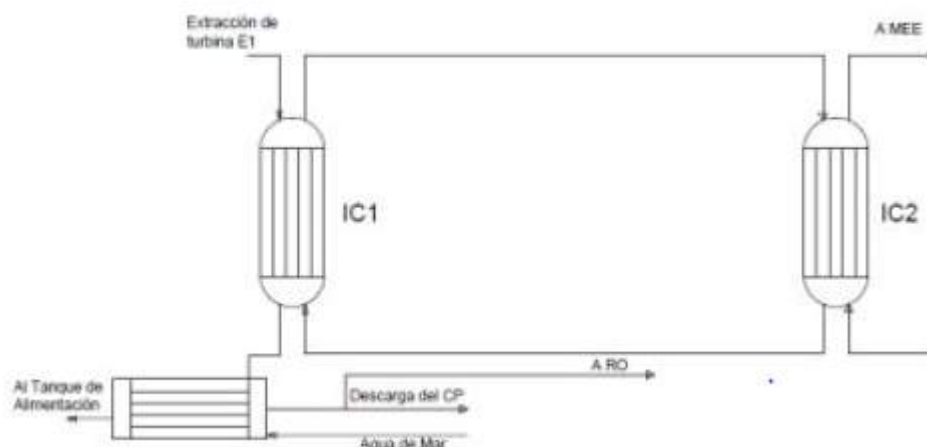
El mismo estudio que ha analizado el acoplamiento térmico con una planta MED, ha estudiado diferentes alternativas para vincular el CAREM25 a una planta desalinizadora con una composición híbrida, es decir formada por módulos de RO y MED. Se destaca el hecho de que el acople con la planta RO se realiza tanto con energía eléctrica como energía térmica, utilizada para mejorar el rendimiento de filtrado. Por otro lado, en el estudio planteado, tanto la obra de toma como la descarga es compartida. Las ventajas de la utilización de las plantas híbridas fueron desarrolladas en la sección 4.2.4.

<sup>131</sup> International Atomic Energy Agency (2002). *Status of design concepts of nuclear desalination plants*, IAEA-TECDOC 1326, Viena, Austria.(ref. [25]), p.27.

<sup>132</sup> Van Straaten, H. y Mazzaccone, A. (2016). *Estudio técnico económico de sistemas de desalinización y usos del vapor acoplados a centrales nucleares de baja potencia. Estudio de la desalinización de agua de mar por destilación multiefecto y ósmosis inversa*, Tesis de grado de ingeniería industrial de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.(ref.[59]), pp.81-123.

<sup>133</sup> Ibídem.

Se han planteado diferentes configuraciones para comparar su rendimiento, resultando el mejor el presentado en la Figura 71, donde en vez de proyectar un intercambiador de calor para el precalentamiento del agua de alimentación de RO, directamente se aprovecha el calor residual liberado en el condensador principal. Dicho esquema es el que presenta menor CEE, con valores entre 8 y 15 kWh/m<sup>3</sup>, valores menores que acoplando solo con MED (ver 6.3.3). Por otro lado, se maximiza el caudal de producción de agua desalinizada, alcanzando los 20.000 m<sup>3</sup>/día. Vale la pena desatacar que la planta MED funciona a la máxima capacidad (los 6.367 m<sup>3</sup>/día presentados en 6.3.3).<sup>134</sup>



**Figura 71 – Acople óptimo para una planta desalinizadora híbrida RO + MED, utilizando el CAREM25** <sup>135</sup>

Se concluye por lo tanto que esta configuración, no solo resulta técnicamente viable para utilizarla como alimentación de agua de la propia central, y alimentación de agua potable a alguna localidad vecina, sino que permite obtener mejores rendimientos, tanto en consumo energético como en caudal obtenido, que otras configuraciones de desalinización.

Por lo tanto, si bien en el capítulo 4.3 se había concluido que a la hora de pensar en futuros proyectos de desalinización de agua convendría proyectar una planta RO, estos resultados presentados para el CAREM, sumado a las ventajas propias de las plantas híbridas (ver sección 4.2.4), arrojan como conclusión que aún más relevante que continuar con la factibilidad económica del acople a una planta RO es realizarlo con una planta híbrida RO + MED.

#### **6.4. Factibilidad técnica de instalación del CAREM para desalinización nuclear en los EAU**

Hasta aquí se ha comprobado la factibilidad de utilizar el CAREM como fuente de energía para lograr la desalinización nuclear, abstrayéndose de los EAU como lugar a implantar el proyecto. Por lo tanto, a continuación, se remarcan algunas conclusiones, obtenidas en base a lo desarrollado hasta el momento a lo largo del presente trabajo, que permitirán terminar de validez la factibilidad técnica deseada.

- En la sección 3.1.5 ha quedado evidenciado la escasez de agua que afrontan los EAU, así como la estrategia para afrontar este problema mediante el uso de plantas desalinizadoras, a punto tal que representa uno de los mayores productores del

<sup>134</sup> Ibidem.

<sup>135</sup> Ibidem.

mundo de agua desalinizada. Al mismo tiempo, en la sección 3.1.6 se muestra la tendencia creciente del uso del agua, motivado en gran parte por el crecimiento económico (ver 3.1.4) y demográfico (ver 3.1.2) que atraviesa el país. Por lo tanto, es factible la instalación de nuevos proyectos de desalinización de agua. De hecho, en la sección 4.3 se ha concluido que, en base a las plantas proyectadas a futuro, a la hora de pensar en la instalación de una planta de desalinización en los EAU, sería conveniente y lógico utilizar plantas de RO, más allá que en el capítulo anterior, ítem 6.3.4, se concluye que un diseño RO + MED presentaría mejores resultados.

- Las proyecciones de la matriz energética de los EAU prevén un aumento del uso de la energía nuclear y una disminución del uso de los recursos fósiles, especialmente el gas. De hecho, los EAU se encuentran finalizando la construcción de 2 centrales nucleares, Barakah 1 y 2, por lo que cuenta además con el marco regulatorio e institucional propicio y necesario para llevar adelante el mencionado plan (ver 3.2.2). Por lo tanto, es factible la instalación de nuevos proyectos nucleares en el país, ya sea de generación eléctrica como de cogeneración.
- Si bien la opinión pública puede oponerse a la instalación de centrales nucleares en determinadas localidades o regiones, el hecho de que se estén finalizando las centrales nucleares en Abu Dhabi, ya presenta un emirato “amigable” al uso nuclear. Más específicamente, si se deseara el desarrollo de un polo industrial y tecnológico, los alrededores de la ciudad de Ruwais, la más cercana al complejo Barakah, y que además se encuentra en zona de riesgo sísmico bajo de acuerdo a la Figura 15, presentan una posible localización para el CAREM (ver Figura 21).
- La ubicación del polo nuclear de los EAU se ubica sobre la costa del golfo pérsico, con características del agua presentadas en la sección 3.1.5, por lo que hay disponibilidad de suficiente agua para alimentar el circuito terciario de enfriamiento.
- Adicionalmente, en la Figura 18 se observa que Ruwais cuenta con plantas desalinizadoras por lo que no solo es viable para la instalación de nuevos proyectos de desalinización nuclear, sino también para el reemplazo de fuentes energéticas hidrocarburíferas utilizada en plantas ya existentes.
- A pesar de que el CAREM25 ha sido diseñado estructuralmente para una PGA de 0,25g (ver 5.4) y las centrales instaladas en Barakah tengan una PGA de 0,3g, la diferencia en aceleraciones es escasa por lo que, si bien habría que verificar la estructura nuevamente, se puede esperar que el diseño de las Estructuras Sistemas y Componentes (ESC) del reactor argentino no sufran grandes modificaciones respecto a su diseño actual. De todas formas, se destaca que el reactor podría instalarse en zonas de mayor riesgo sísmico, siempre y cuando se realizarán los cálculos y adecuaciones correspondientes
- En la sección 6.3 se ha evidenciado la aptitud del CAREM para ser acoplado a distintos tipos de plantas desalinizadoras, entre las que se destacan los resultados obtenidos para RO e híbridas, con capacidades de generación variables que pueden incluso alcanzar más de 100.000 m<sup>3</sup>/día.

Por todo lo presentado anteriormente, se concluye que el reactor CAREM, ya sea el CAREM25 como su versión comercial, son técnicamente factibles de ser instalados en los EAU en proyectos de desalinización nuclear.

## 7 DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD ECONÓMICA

### 7.1. Introducción

En el presente capítulo se determinará si la desalinización de agua utilizando energía nuclear es competitiva, desde el punto de vista económico, frente a otras fuentes de energía. Para ello, debe decidirse en primera instancia, y debido al alcance limitado de esta tesis, cuál será la fuente de estudio con la cual se comparará. En este caso, se selecciona el gas como fuente energética de comparación, principalmente por lo expuesto en el capítulo 3.2, donde se presentó la dependencia casi total hacia este hidrocarburo en la matriz energética de los EAU, así como el plan energético a futuro que propone una disminución de su incidencia frente a otras fuentes energéticas, como ser las renovables o la nuclear, aclarando que el porcentaje de incidencia a futuro de cada una de estas se encuentra proyectado por el gobierno de los EAU. Por lo tanto, lo que se busca analizar es la factibilidad del reemplazo de la combustión de gas por la energía nuclear.

A tal efecto, se proyectará, de forma conceptual, una planta de desalinización acorde a lo que se ha concluido en los capítulos anteriores, y al CAREM comercial como fuente energética, de forma de obtener el consumo de energía eléctrico y térmico necesarios para poder alimentar el acople, y así obtener desalinización nuclear.

Con los consumos energéticos ya calculados, se realizará la evaluación económica de ambas centrales de generación, asumiendo que la energía que no se utilice para la desalinización de agua será vendida en el sistema eléctrico de los EAU, para poder determinar la factibilidad buscada.

Finalmente, se aclara que en todo el capítulo cuando se utilice el signo “\$”, equivale a dólares americanos (U\$S).

### 7.2. Planta de desalinización

#### 7.2.1. Planta de desalinización proyectada

Para proyectar la planta desalinizadora que será alimentada por una de las fuentes de energía planteada se selecciona, en base a las conclusiones obtenida en el capítulo 6.3.4, una planta híbrida del tipo RO + MED. En el caso ya presentado se disponía una planta RO de 3.500 m<sup>3</sup>/día y otra MED de 6.367 m<sup>3</sup>/día, alimentados por el CAREM25, es decir de 27 MWe, la cual fue analizada en la tesis “Estudio técnico económico de sistemas de desalinización y usos del vapor acoplados a centrales nucleares de baja potencia” de los ingenieros Straaten y Mazzacone.<sup>136</sup>

Ahora bien, debido a que se desea analizar la factibilidad económica para el CAREM comercial, de 480 MWe repartidos en 4 módulos de 120 MWe, deberá escalarse linealmente la capacidad de la planta desalinizadora, para plantear una nueva teórica acorde a la potencia del reactor. De esta forma se plantea una planta RO de 62.200 m<sup>3</sup>/día, y una MED de 113.200 m<sup>3</sup>/día. Así, mientras que para la configuración híbrida original se demandaban 8,4 MWt/día para el circuito de MED, en este estudio se considera una extracción de potencia térmica de 1.494 MWt/día. Por otro lado, entre la entrada de agua al proceso de desalinización, descarga de condensado, servicios propios del RO y MED y otros consumos del proceso, se consumía 15.886 KWh/día, por lo que escalando linealmente los consumos para la planta proyectada para la tesis se adopta un consumo de 258.752 KWh/día.

Los valores anteriormente mencionados son utilizados como consumos energéticos que se deben deducir de las capacidades nominales de generación de la planta de energía, tanto nuclear como en el caso del CCG.

---

<sup>136</sup> Ibídem.

### 7.3. Costo de generación

#### 7.3.1. Consideraciones generales

En el presente capítulo se realiza la comparación económica de la instalación y operación de una central de energía que alimente a la planta desalinizadora presentada anteriormente, y venda el excedente de energía a la red. Respecto al acople, en base a la potencia eléctrica y térmica extraída mediante el mismo, se descuenta la misma de la potencia disponible para la venta.

El criterio de evaluación económica será mediante el Valor Actual Neto (VAN), que permite obtener el valor presente de un determinado flujo de fondos, es decir, que considera el valor tiempo del dinero para poder obtener el valor actual del beneficio de una inversión. El VAN se obtiene mediante la expresión indicada en:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

**Ecuación 2 - Valor actual neto**

Donde:

- $V_t$  representa el flujo de fondo de cada período
- $I_0$  representa la inversión del primer año del proyecto, denominado año cero.
- $n$  es el número de períodos considerados.
- $K$  es la tasa de descuento.

Respecto a la tasa de descuento, si bien hay diversos métodos para obtenerla, tales como el WACC<sup>137</sup> o CAPM<sup>138</sup>, que consideran factores como el riesgo del negocio, el riesgo del país, y la tasa de interés libre de riesgo, a los efectos de la presente tesis se adoptará una tasa del 6%. Esto se debe a que la mayoría de las evaluaciones económicas de proyectos de desalinización nuclear presentadas en el TECDOC 1561 presentan tasas entre 6 y 10%. Particularmente, en el análisis realizado para el CAREM, la tasa adoptada fue el 6%.<sup>139</sup>

El horizonte del proyecto considerado será 40 años, que es la vida útil del CAREM. Por lo tanto, y debido a que la vida útil de un CCG es menor, se hará una reinversión de capital al final de la vida útil de esta última para extenderle la vida útil, y así equipar los plazos de proyecto.

Debido a que en los EAU las empresas generadoras y el transporte de energía son controlados monopólicamente por cada emirato, la producción de energía está libre de impuestos.<sup>140</sup>

Para obtener el precio de venta de la energía, se utilizó el cuadro tarifario de la Compañía Distribuidora de Abu Dhabi, ya que los usuarios que consumen más de 1 MW diario abonon una tarifa que representa el costo real de la misma, y no un valor subsidiado<sup>141</sup>. De esta forma, sobre el

<sup>137</sup>WACC proviene de las siglas de Weighted Average Cost of Capital

<sup>138</sup> CAPM proviene de las siglas en inglés de Capital asset pricing model

<sup>139</sup> **International Atomic Energy Agency (2007). *Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specific Studies*, IAEA-TECDOC 1561, Viena, Austria.(ref.[29]), pp.78-82.**

<sup>140</sup> **Agrawal, R. (2016). *Electricity Regulation in the United Arab Emirates: overview*, Thompson Reuters Practical Law, en: [https://content.next.westlaw.com/\(ref.\[3\]\)](https://content.next.westlaw.com/(ref.[3])).**

<sup>141</sup> DOE (ref.[64]), en: <http://www.doe.gov.ae/economic-regulation/tariffs-and-charges.aspx> (acceso 24/02/2019),

valor que abonan los grandes usuarios, que varía entre 0,07 \$/KWh y 0,10 \$/KWh, se adopta el promedio, 0,08 \$/KWh. Sin embargo, el precio de venta para el generador es ligeramente menor pues debe restarse el beneficio del distribuidor, por lo que se asume un precio de venta final de 0,07 \$/KWh. Se aclara que sobre este valor no se realizará un análisis de sensibilidad ya que, al afectar a la producción de energía, y ser las dos centrales planteadas de la misma capacidad nominal, la incidencia es prácticamente igual en ambos casos.

Respecto al precio de la tierra, la misma no se considera para la inversión inicial ya que, al ser el CAREM un diseño compacto, al igual que lo son los CCG, se considera igual en ambos casos.

Finalmente se deja aclarado que no se consideran aspectos financieros, tales como préstamos, pues lo que se busca es analizar la factibilidad económica libre de distorsiones.

### 7.3.2. Generación con un Ciclo Combinado de Gas (CCG) – Escenario base

Para el presente análisis se considera un CCG de 480 MWe de capacidad de generación eléctrica, es decir de potencia equivalente al CAREM480. Los costos de instalación, así como los costos directos e indirectos de operación y mantenimiento, se pueden ver, junto con los parámetros principales utilizados para el cálculo en la Tabla 11.

Ciclo Combinado de Gas		
Capacidad nominal	480	MWe
Potencia térmica extraída de MED	518.127.720,00	KWth/año
Energía extraída de RO	89.722.256,00	KWh/año
Eficiencia	50	%
Vida Útil	25	años
Período de construcción	3	años
Costo de instalación	794 <sup>142</sup>	U\$/KW
Costo de O y M directos	2,06 <sup>143</sup>	U\$/Mwe.hr
Costo de O y M indirectos	10,3 <sup>144</sup>	\$/KW/año
Disponibilidad	95	%
Consumo de combustible	6300 <sup>145</sup>	BTU/KWh
Consumo de combustible	0,0063	MMBTU/KWh
Capacidad efectiva	456	MWe
Horas por año	8.760	horas/año
Generación efectiva	3.994.560	MWeh/año

**Tabla 11 – Parámetros principales de la evaluación del CCG<sup>146</sup>**

Debe considerarse que sobre la capacidad de generación eléctrica se deduce la potencia eléctrica y térmica extraída por los procesos RO y MED, para obtener la generación efectiva, que

<sup>142</sup> EIA (ref.[75]), en: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table\\_8.2.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf) (acceso el 24/02/2019)

<sup>143</sup> *Ibidem*.

<sup>144</sup> *Ibidem*.

<sup>145</sup> *Ibidem*.

<sup>146</sup> Fuente: elaboración propia.

es el valor de energía que se vende. Para el costo de combustible, sin embargo, esta deducción no sea realiza ya que el combustible efectivamente es consumido para alimentar a la desalinización.

Respecto al costo del combustible, se ha utilizado la proyección del *World Bank* para el precio internacional del gas hasta el año 2030, adoptando un valor igual al de los Estados Unidos ya que, al igual que los EAU, cuentan con abundantes reservas y explotación de *shale gas*. A partir del año 2030, y tal como se puede observar en la Figura 72, la curva demuestra, al menos en base a la proyección, que el precio del gas continúa aumentando con la misma tendencia, es decir un 3,5% anual. Sin embargo, y en base a la incerteza asociada en una proyección en un horizonte de tiempo extenso, se considera que dicha tendencia se atenuará con el tiempo, por lo que asume un aumento del costo del combustible del 1% anual.

**World Bank Commodities Price Forecast (nominal US dollars)** Released: October 29, 2018

Commodity	Unit	Forecasts												
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2030
<b>Energy</b>														
Coal, Australia	\$/mt	70.1	58.9	66.1	88.5	108.0	100.0	90.0	86.4	83.0	79.7	76.5	73.5	60.0
Crude oil, avg	\$/bbl	96.2	50.8	42.8	52.8	72.0	74.0	69.0	69.1	69.2	69.3	69.4	69.5	70.0
Natural gas, Europe	\$/mmbtu	10.1	7.3	4.6	5.6	8.0	7.5	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	8.0
Natural gas, US	\$/mmbtu	4.4	2.6	2.5	3.0	2.9	2.7	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2	3.3	4.0
Natural gas LNG, Japan	\$/mmbtu	16.0	10.9	7.4	8.6	10.0	9.7	8.5	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	10.0

Tabla 12 – Proyección del precio del gas natural<sup>147</sup>

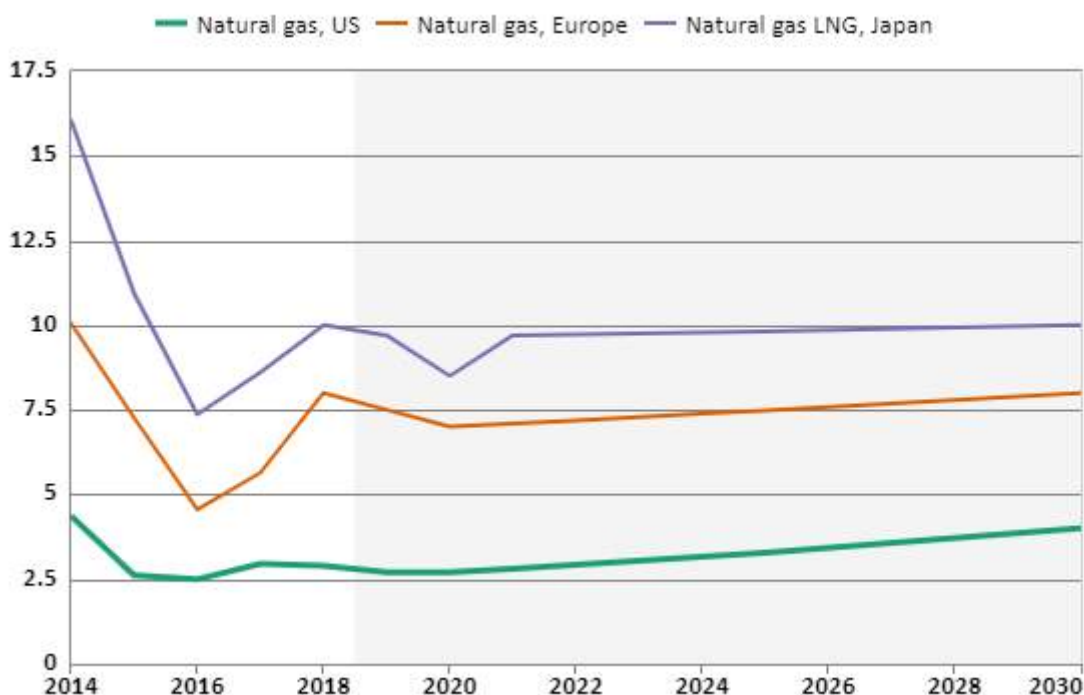


Figura 72 – Proyección del precio del gas, según el World Bank, en \$/MMbtu<sup>148</sup>

<sup>147</sup> World Bank ([73]), en: <http://pubdocs.worldbank.org/en/823461540394173663/CMO-October-2018-Forecasts.pdf> (acceso 27/02/2019)

<sup>148</sup> Fuente: World Bank Commodity Forecast Price Data, October 2018



En la Tabla 13 se indica el costo de combustible considerado, teniendo en cuenta que anualmente se consumen 25.165.728 MMBTU/año de gas. Los 3 primeros años no hay consumo de combustible ya que la planta se encuentra en etapa de construcción.

Año	Período	Precio del gas (\$/MMBTU)	Costo anual de combustible
2019	0	2,7	0*
2020	1	2,8	0*
2021	2	2,9	0*
2022	3	3,0	75.334.570
2023	4	3,1	77.971.280
2024	5	3,2	80.700.274
2025	6	3,3	83.524.784
2026	7	3,4	86.448.151
2027	8	3,6	89.473.837
2028	9	3,7	92.605.421
2029	10	3,8	95.846.611
2030	11	3,9	99.201.242
2031	12	4,0	100.193.255
2032	13	4,0	101.195.187
2033	14	4,1	102.207.139
2034	15	4,1	103.229.210
2035	16	4,1	104.261.502
2036	17	4,2	105.304.117
2037	18	4,2	106.357.159
2038	19	4,3	107.420.730
2039	20	4,3	108.494.938
2040	21	4,4	109.579.887
2041	22	4,4	110.675.686
2042	23	4,4	111.782.443
2043	24	4,5	112.900.267
2044	25	4,5	114.029.270
2045	26	4,6	115.169.562
2046	27	4,6	116.321.258
2047	28	4,7	117.484.471
2048	29	4,7	118.659.315
2049	30	4,8	119.845.909
2050	31	4,8	121.044.368
2051	32	4,9	122.254.811
2052	33	4,9	123.477.359
2053	34	5,0	124.712.133
2054	35	5,0	125.959.254
2055	36	5,1	127.218.847
2056	37	5,1	128.491.035
2057	38	5,2	129.775.946

2058	39	5,2	131.073.705
2059	40	5,3	132.384.442
2060	41	5,3	133.708.287
2061	42	5,4	135.045.369
2062	43	5,4	136.395.823
2063	44	5,5	137.759.781

**Tabla 13 – Costo del combustible consumido anual en función del valor del gas<sup>149</sup>**

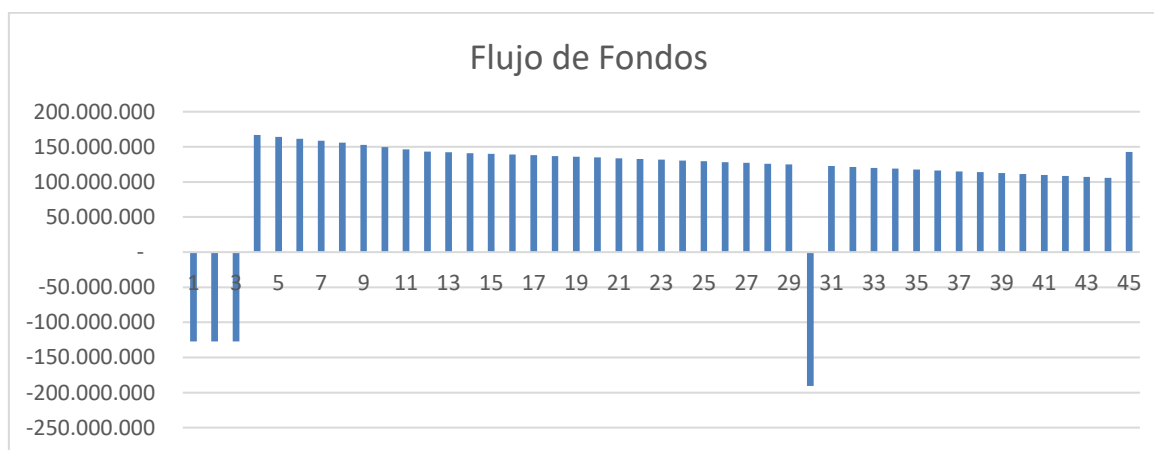
Por lo tanto, en base a la información presentada anteriormente, se tienen los costos de implantación, ingresos y costos de Operación y Mantenimiento (O&M), al margen del combustible, que se observan en la Tabla 14.

Costo de construcción	381.120.000,00	\$
Ingresos anuales	255.204.172	\$/año
Costo de O&M Directo	8.228.794	\$/año
Costo de O&M Indirecto	4.696.800	\$/año
Valor residual	38.112.000	\$

**Tabla 14 – Costos e ingresos principales del CCG<sup>150</sup>**

Finalmente, como se ha mencionado en la sección 7.3.1, se considera una reinversión al final de los 25 años de vida útil, es decir al período 28, para prolongar el funcionamiento del CCG. La misma se asume en un 50% del costo de instalación inicial, es decir 190.560.000 \$, que se ejecutan en 1 solo año, en el que no opera la planta. Asimismo, se considera un valor residual al final del horizonte del proyecto equivalente al 10% de la inversión inicial.

De esta forma se obtiene un VAN de 1.422.723.161 \$, y un flujo de fondos actualizado que se aprecia en la Figura 73 (para más detalles ver el ANEXO C).



**Figura 73 – Flujo de Fondos actualizados (\$ vs período) para el CCG<sup>151</sup>**

<sup>149</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>150</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>151</sup> Fuente: elaboración propia.

### 7.3.3. Generación con el CAREM comercial

De manera análoga a lo desarrollado en el presente capítulo, se calcula el VAN para el CAREM480. En la Tabla 15 pueden apreciarse los parámetros principales de cálculo. Al igual que en el caso del CCG, se descuenta la potencia demandada por la planta desalinizadora.

CAREM 480		
Capacidad nominal	480	MWe
Potencia térmica extraída de MED	490.857.840,00	KWth/año
Energía extraída de RO	85.000.032,00	KWh/año
Eficiencia	27	%
Vida Útil	40	años
Período de construcción	5	años
Costo de instalación	1650 <sup>152</sup>	U\$/KW
Costo de O y M	9,4 <sup>153</sup>	\$/MWeh
Costo del combustible	7,2 <sup>154</sup>	\$/MWeh
Costo de desmantelamiento	0,002	\$/KWeh
Disponibilidad	90 <sup>155</sup>	%
Capacidad efectiva	432	MWe
Horas por año	8.760	horas/año
Generación efectiva	3.784.320	MWeh/año

**Tabla 15 – Parámetros principales de la evaluación del CAREM<sup>156</sup>**

Se puede apreciar que en el caso de la energía nuclear aparece el costo de desmantelamiento, que es el proceso que se realiza al final de la vida útil del reactor para la descontaminación final de la planta. Para ello, se estima un costo anual de 0,002 \$/KWeh<sup>157</sup> en concepto de fondo de decomisionado, siguiendo el método utilizado en los Estados Unidos, que se imputa en su totalidad en el año 40 de operación.

Se aclara que en el caso de la energía nuclear no se aplica variación del costo del combustible en el tiempo. Esto se debe a que los principales productores de uranio del mundo son Australia y Canadá, países que presentan una estabilidad económica y política que se la trasladan al Uranio, caso distinto a lo que ocurre con los hidrocarburos.

Por lo tanto, se tienen los costos de implantación, ingresos y costos de Operación y Mantenimiento (O&M), que se observan en la Tabla 14.

Costo de construcción	792.000.000,00	\$
Ingresos anuales	249.675.185	\$/año

<sup>152</sup> International Atomic Energy Agency (2007). *Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specific Studies*, IAEA-TECDOC 1561, Viena, Austria. (ref.[29]), Op. Cit, p.92

<sup>153</sup> Ibídem.

<sup>154</sup> Ibídem.

<sup>155</sup> Ibídem.

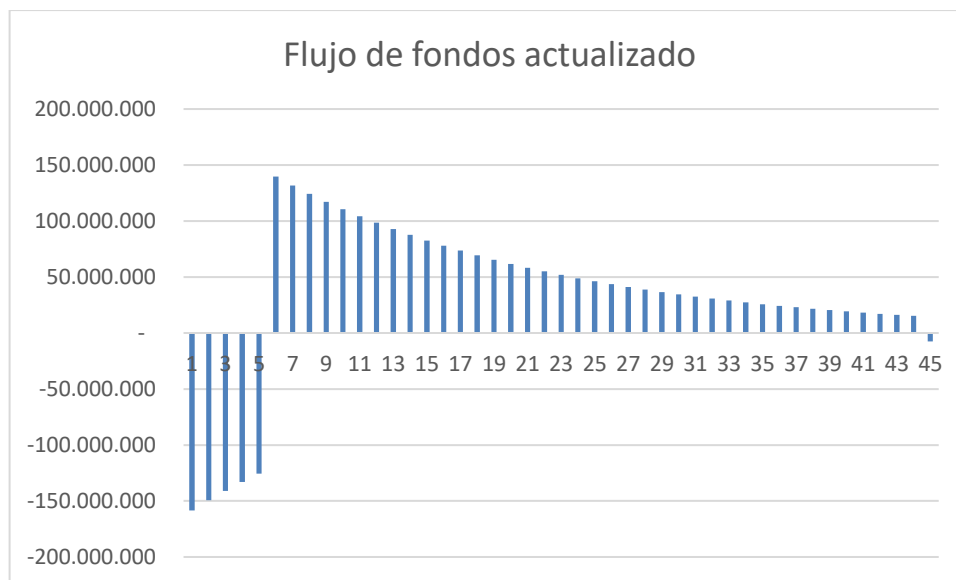
<sup>156</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>157</sup> WNA (ref. [78]), en: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx> (acceso el 24/02/2019).

Costo de O&M	35.572.608	\$/año
Costo de combustible	27.247.104	\$/año
Costo de desmantelamiento	285.343.068,10	\$

**Tabla 16 – Costos e ingresos principales del CAREM**<sup>158</sup>

De esta forma se obtiene un VAN de 1.085.158.949 \$, y un flujo de fondos actualizado que se aprecia en la Figura 73 (para más detalles ver el ANEXO D).



**Figura 74 – Flujo de Fondos actualizados (\$ vs período) para el CAREM**<sup>159</sup>

#### 7.3.4. Generación con un Ciclo Combinado de Gas (CCG) – Análisis de sensibilidad al precio del combustible

Tal como se ha mencionado anteriormente, se realiza el análisis de sensibilidad del precio del combustible. A tal efecto, se plantean dos escenarios, en primera instancia, se asumirá que el precio del gas natural se mantiene constante desde el año cero del proyecto, denominado ESCENARIO A. En dicho escenario, el precio base es el indicado en la Tabla 13 para el año 2019, es decir 2,7 \$/MMBTU. Por otro lado, en el ESCENARIO B se aumenta el costo del combustible para el período 3, respecto al planteado en la sección 7.3.2, en un 25%, y se sigue con la misma tendencia de crecimiento, es decir 3,5% hasta el año 2030 y a partir de allí un 1% anual. De esta forma, se obtiene el costo de combustible, para los períodos en los que cambia la tendencia, que se aprecia en la Tabla 17. El costo de combustible en el ESCENARIO B para la totalidad de los años se encuentra en el ANEXO E.

Año	período	Precio del gas (\$/MMBTU)	Costo anual de combustible
2022	3	3,7	-
2030	11	4,9	117.710.265
2063	44	6,8	121.830.124

**Tabla 17 – Costo del combustible para el ESCENARIO B**<sup>160</sup>

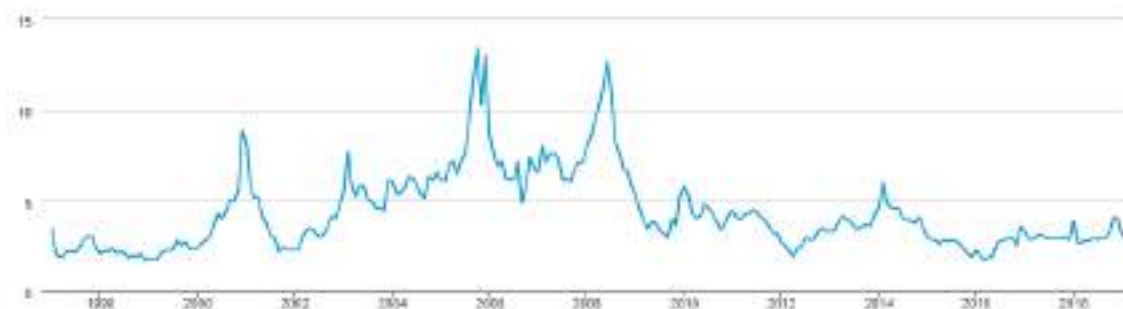
<sup>158</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>159</sup> Fuente: elaboración propia.

	ESCENARIO A	ESCENARIO B
VAN (\$)	1.828.101.421	1.107.196.124
VARIACION (RESPECTO A ESCENARIO BASE)	28,49%	-22,18%

**Tabla 18 – Variación de resultados entre diferentes escenarios**<sup>161</sup>

En la Tabla 18 se puede observar que el VAN del CCG está fuertemente ligado al precio del gas. Así, el VAN obtenido en el ESCENARIO A aumenta un 28,49% respecto al escenario base, mientras que para el ESCENARIO B disminuye un 22,11%. De esta forma, considerando la volatilidad histórica en el precio del gas, que se puede observar en la Figura 75 para el precio spot del Henry Hub<sup>162</sup>, resulta difícil proyectar la rentabilidad de un proyecto de este tipo.



**Figura 75 – Evolución del precio del gas natural Henry Hub en \$/mmBTU**<sup>163</sup>

Por lo tanto, si bien al comparar el VAN obtenido para el CCG y el CAREM, la fuente de energía fósil presentaba un beneficio un 30% mayor que la nuclear, el análisis de sensibilidad demuestra que ante un aumento del 25% en el precio del gas natural los resultados son prácticamente iguales (apenas un 2% más beneficioso el CCG). Si a esto le sumamos la volatilidad histórica del precio del gas presentada en la Figura 75 se puede concluir que, a pesar de que estrictamente desde el punto de vista financiero la generación mediante la combustión del gas natural es más beneficiosa que la energía nuclear, al menos son comparables por la sensibilidad que tiene el costo del gas en el rendimiento final del proyecto.

#### 7.4. Efectos intangibles y externalidades

Si bien desde un enfoque de inversión privada la factibilidad económica suele asumirse directamente como la viabilidad financiera de un proyecto, en el caso de proyectos de inversión pública, donde los fondos para la ejecución del proyecto son aportados por el Estado, es decir toda la sociedad, deben considerarse el impacto económico del proyecto en toda la sociedad y medio ambiente donde estará implantado el mismo. Existen estudios que permiten asociar estos impactos sociales y ambientales, sea costos o beneficios, en valores monetarios de forma de poder compararlos con las erogaciones e ingresos financieros. De esta forma, por ejemplo, en el caso de un proyecto para construir un paso bajo nivel en una barrera del tren, se puede monetizar el tiempo ahorrado por las personas, o los menores costos esperados en el sistema de salud por la disminución en los accidentes. En la presente tesis, no se espera llegar a dicho nivel de análisis

<sup>160</sup> Fuente: elaboración propia.

<sup>161</sup> Fuente: elaboración propia.

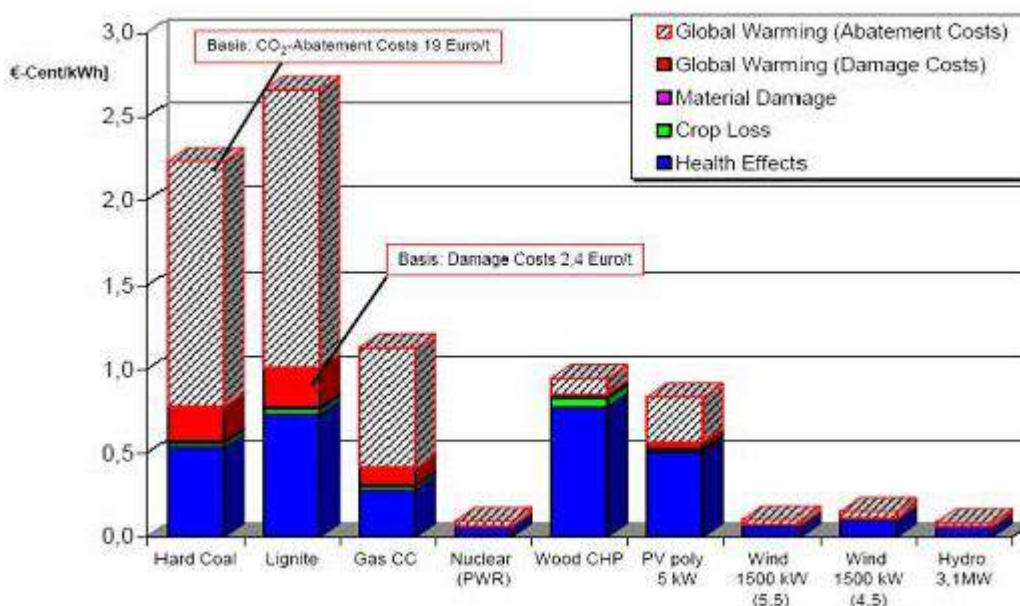
<sup>162</sup> El Henry Hub es un centro importante del comercio entre los diferentes ductos de gas natural ubicada en Louisiana. El precio del Henry Hub se utiliza como referencia para el precio del gas natural en América del Norte por los contratos de NYMEX (**N**ew **Y**ork **M**ercantile **E**xchange)

<sup>163</sup> EIA (ref.[75]), en: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>

en cuanto al análisis económico de las externalidades de la instalación de un proyecto de desalinización nuclear, sin embargo, es necesario conocerlas para poder considerarlas a la hora de determinar la factibilidad económica que se desea evaluar, así como el impacto de las mismas de forma genérica.

En primera instancia, debe considerarse que al no utilizar el gas natural producido en el país para alimentar un CCG se generará un beneficio indirecto por mayor disponibilidad del recurso, que puede ser utilizado ya sea para alimentar otras centrales térmicas y así disminuir las importaciones de gas, o directamente para exportarlo y así generar mayor recaudación. Por otro lado, el desarrollo de la industria nuclear trae aparejada el desarrollo y especialización de un sector de la industria local, generando más puestos de trabajo y posibles exportaciones de equipos y componentes.

Adicionalmente, los impactos ambientales que se describirán en el capítulo 8, pueden traducirse en impactos económicos sobre la salud humana, por ejemplo por las enfermedades en las vías respiratorias que causan las partículas producidas por la combustión de los hidrocarburos, o por el hecho de que la combustión de gas natural libera gases de efecto invernadero y, por lo tanto, favorece al calentamiento global que a su vez afecta a los cultivos. En la Figura 76 se puede apreciar como la energía nuclear es, junto con la energía eólica, la que presenta menores costos por externalidades, con valores que representan prácticamente la décima parte que la combustión del gas natural, que a su vez es el que presenta menores costos si se consideran exclusivamente los hidrocarburos. Lo anteriormente dicho resulta prácticamente determinante si se considera, además, que el estudio que permitió obtener dichos resultados consideraba también el riesgo de accidente y muerte, principales objeciones hacia la energía nuclear.



**Figura 76 – Costos externos de las distintas fuentes de energía, para centrales de generación en Alemania, en Centavos de euro por KWeh, en el año 2010<sup>164</sup>**

Otro mecanismo que permite asignarle un valor a los efectos ambientales son los bonos de carbono, que fueron implementados a partir del Protocolo de Kyoto como mecanismo para reducir los gases contaminantes. Los bonos, que permiten el “derecho a contaminar” emitiendo una

<sup>164</sup> International Atomic Energy Agency (2007). *Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specific Studies*, IAEA-TECDOC 1561, Viena, Austria.(ref.[29]), pp.8-13.

tonelada de CO<sub>2</sub>, se comercializan en el mercado de valores donde las empresas contaminantes los compran para poder seguir emitiendo los gases de efecto invernadero. De esta forma, un CCG debería comprar cierta cantidad de bonos para producir energía mediante la combustión de gas, y esto aumentaría el costo de generación. De todas formas, debe considerarse que los EAU firmaron el Protocolo de Kyoto como país no Anexo I<sup>165</sup>, y por lo tanto no están obligados a la reducción de la emisión de los gases de efecto invernadero, aunque llevan hace años una política que busca mitigar este efecto adverso.

Finalmente, recopilando lo presentado en el presente capítulo, y vinculándolo a las conclusiones de la sección 7.3.4, la generación mediante energía nuclear, alimentando también una planta desalinizadora de agua, es prácticamente igual de conveniente que la generación mediante gas, desde el punto de vista económico. Por lo tanto, y a los efectos de los objetivos planteados para la presente tesis, se la considera económicamente factible para su aplicación en los EAU.

---

<sup>165</sup> La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue adoptada en Nueva York en 1992, y posteriormente en 1997 los gobiernos miembros adicionaron el Tratado de Kyoto. Los países miembro se clasifican según diferentes Anexos, siendo las obligaciones de reducción de emisiones diferentes según el Anexo en el que se esté. De esta forma, los países del Anexo I (países desarrollados y economías en transición) tienen mayores obligaciones. Los países del Anexo II (son los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico, OCDE) deben proveer apoyo financiero y técnico. Finalmente, los países no Anexados, como los EAU, no tienen obligaciones actualmente.



## 8 DESALINIZACIÓN NUCLEAR: FACTIBILIDAD AMBIENTAL

### 8.1. Introducción

Ya se ha demostrado que la desalinización de agua aporta importantes beneficios desde el punto de vista socioeconómico para poblaciones que sufren la escasez de agua. Sin embargo, como toda actividad en la que interviene el ser humano, debe analizarse su impacto, y por lo tanto su factibilidad de ser ejecutada, sobre el medio ambiente. En tal sentido, se presentarán en el presente capítulo los impactos ambientales negativos del proceso de desalinización propiamente dicho, así como las posibles herramientas y medidas para mitigarlos.

Por otro lado, y al igual que en el capítulo anterior, debido a que el objetivo específico de la tesis radica en demostrar la factibilidad ambiental de la utilización del reactor CAREM, se comparará el impacto producido por la generación de energía utilizando dicho reactor nuclear, frente a la generación térmica a gas. A los motivos para la selección de las centrales a gas, expuestos en 7.1, se agrega que no se realizará la comparación con las energías renovables, principal alternativa en cuanto a lo ambiental se refiere, ya que si bien se está estudiando la utilización de esta energía para alimentar plantas desalinizadoras, la intermitencia de las mismas a lo largo del día y los meses hace que no permitan garantizar el abastecimiento de energía requerido para el proceso de desalinización de forma continua. De esta forma, cualquier intento por alimentar la desalinización de agua con fuentes renovables debe estar respaldada por centrales térmicas, en el caso de los EAU seguramente a gas, pues son de rápido accionamiento en caso de que disminuya la producción energética, por lo que no se estaría reemplazando completamente, al menos para el proceso estudiado, la dependencia de energías fósiles.

Finalmente, se aclara que se ha considerado que la planta de energía cuenta con un sistema de enfriamiento de ciclo directo. Es decir, que no se cuenta con torres de enfriamiento, sino que el agua se descarga directamente al mar.

### 8.2. Impacto ambiental de la desalinización de agua<sup>166</sup>

Para evaluar el impacto ambiental exclusivamente de la desalinización de agua, se considera una planta desalinizadora acoplada a una central energética, independientemente del tipo de combustible que utilice, pues se hará foco solamente en el proceso de tratamiento de agua.

#### 8.2.1. Impacto ambiental de la toma de agua

Si bien suele asociarse la contaminación producida por las plantas desalinizadoras exclusivamente con la descarga de condensado, diversos estudios han comprobado el efecto negativo que la toma de agua genera. Esto resulta entendible si se considera que, debido a que las olas, corrientes y mareas afectan la eficiencia de la toma de agua, las mismas suelen estar ubicadas en bahías o zonas calmas naturalmente protegidas, que son las zonas que presentan mayor biodiversidad, motivo por el que cualquier obra o actividad realizada presentará mayor impacto al medio ambiente.

Básicamente la toma de agua, genera corrientes en la zona de absorción que producen el arrastre de microorganismos y otros seres vivos hacia la reja de entrada de agua. En función del tamaño de la malla de la reja, y el tamaño de los organismos, puede producirse que los más pequeños sean arrastrados por la tubería, produciendo generalmente la muerte de los mismos producto de asfixia y golpes contra las estructuras. Por otro lado, al producirse el arrastre, los

---

<sup>166</sup> Todo el capítulo 8.2, salvo que se aclare lo contrario, de: **International Atomic Energy Agency (2010). Environmental Impact Assessment Of Nuclear Desalination, IAEA-TECDOC 1642, Viena, Austria.**(ref.[31]), pp.9-68.

animales mayores sufren el impacto contra la reja y, si bien suele no producir la muerte de los mismos en el acto, puede hacerlo por lesiones internas tiempo después.

Los efectos anteriormente mencionados se reducen en función del tipo de obra de toma, que puede ser directa (ver Figura 77) o indirecta (Figura 78). La primera se utiliza para plantas desalinizadoras con mayor capacidad de producción diaria pues posee mayor capacidad de captación, mientras que la indirecta, si bien provee agua con menor cantidad partículas, es decir de mayor calidad, por ser naturalmente filtrada por el suelo, presenta menor capacidad de absorción. Adicionalmente, debe considerarse que, en el caso de tratarse de un proceso de desalinización nuclear, al compartir ambas plantas la obra de toma, el requerimiento de agua será mayor, por lo que difícilmente se pueda utilizar una toma mediante método indirecto. De hecho, no hay actualmente centrales nucleares que utilicen este tipo de toma.

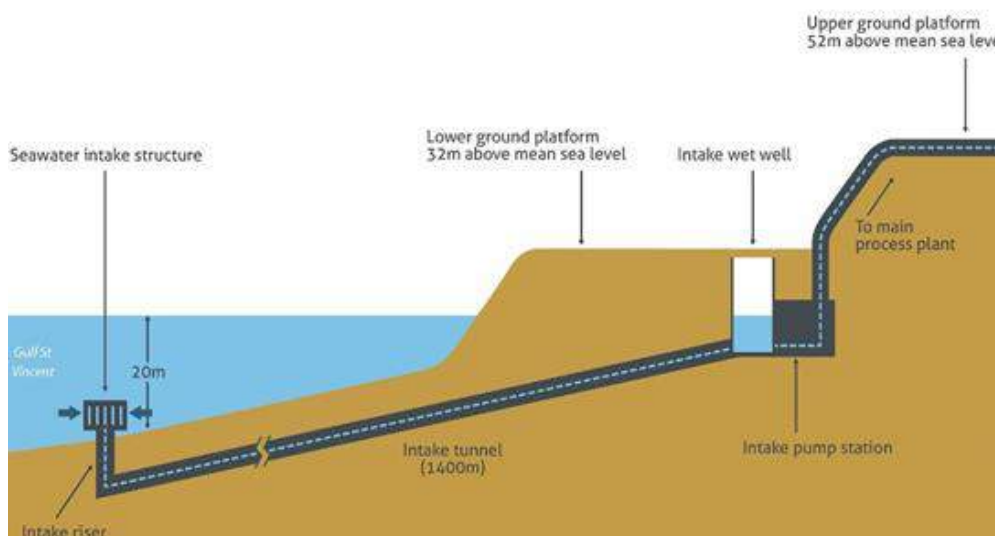


Figura 77 – Obra de toma directa típica

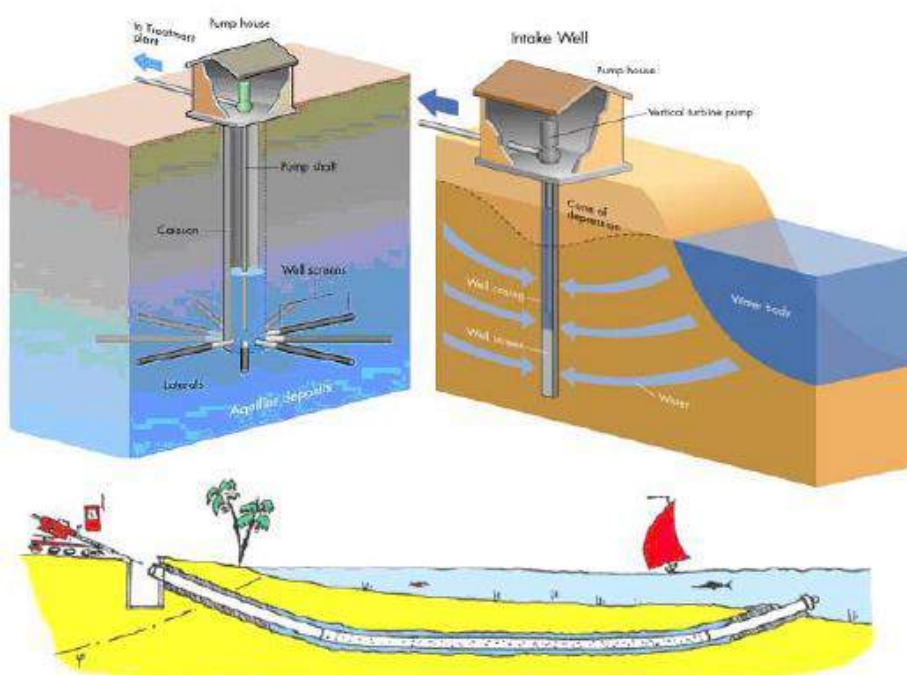


Figura 78 – Configuraciones típicas de tomas indirectas

Además, debe considerarse el impacto que el proceso constructivo propiamente dicho tiene sobre el lecho marino. Estudios han demostrado que demanda hasta 3 años restaurar el ecosistema marino en la zona de impacto de un ancla. En el caso de la obra de toma, por lo tanto, el periodo podría ser aún mayor.<sup>167</sup>

Existen sin embargo medidas para minimizar el impacto negativo sobre la zona marina. En primera instancia, se puede desplazar el punto de captación hacia zonas más profundas de forma de evitar las zonas de mayor biodiversidad. Sin embargo, al tener así un mayor costo de obra de impulsión y cañerías, es difícil que se aplique esta solución sin una legislación que lo regule. Por otro lado, nuevos esquemas de absorción se están probando, como por ejemplo el de “galerías de infiltración, que permitirían aumentar el caudal de agua, respecto a las tomas indirectas, haciéndolo viable para la cogeneración con centrales nucleares. Estas galerías presentan las ventajas de las tomas de agua indirecta, como la filtración natural del líquido, pero solucionan la limitación de caudal de los mismos.



**Figura 79 – Toma de agua mediante galerías de infiltración**

Adicionalmente, se deberían instalar sistemas de limpieza de las rejillas mediante jets de aire, para evitar que los animales queden atrapados en ellas, así como mejorar la tecnología de las rejillas de tomas por aquellas que minimicen el riesgo para los seres vivos. Por último, reducir la velocidad de la captación a menos de 0.15 m/seg es recomendado para que la fuerza de arrastre sea lo menor posible, y por lo tanto también lo sea el potencial daño hacia los seres vivos.

### 8.2.2. Impacto ambiental de la descarga de salmuera

El efluente del proceso de desalinización de agua contiene una concentración de sales y sólidos en suspensión considerablemente mayor que el agua a tratar, llegando incluso al doble. Adicionalmente, y en función del pre o post tratamiento requerido por cada tipo de proceso de desalinización, el efluente puede presentar distintos químicos, agregados artificialmente durante el proceso, así como una mayor temperatura que la de ingreso al proceso. Como es esperable, la descarga de un líquido con las características anteriormente mencionadas puede generar un impacto ambiental altamente negativo, que suele analizarse tanto por el total de sólidos o químicos presentes en la descarga, o en el ecosistema natural, generalmente marino, en la zona de la descarga.

<sup>167</sup> **International Atomic Energy Agency (2010). Environmental Impact Assessment Of Nuclear Desalination**, IAEA-TECDOC 1642, Viena, Austria.(ref.[31]), Op. Cit., p.19.

Si bien se han producido grandes avances en la concientización del impacto ambiental producido por la descarga, aún no existe normativa internacional que la regule como tal. Sin embargo, distintos países la regulan al considerarla una fuente contaminante proveniente desde la tierra. Al margen de la legislación propiamente dicha, el hecho de que la descarga de condensado afecte al agua que posteriormente podría ser captada nuevamente para el proceso de desalinización, hace que este tema haya sido muy estudiado pues, a menor calidad del agua captada para el tratamiento, mayor costo tiene el pretratamiento necesario. Adicionalmente, en el caso de la RO, a menor salinidad presente en el agua a tratar, menor cantidad de energía es necesaria para bombear el líquido a través de las membranas, así como menor generación de incrustaciones y obstrucciones. Si bien los químicos y componentes presentes en la descarga dependen de cada proceso, a modo general se puede mencionar que típicamente se encuentra en la descarga de una planta desalinizadora hipoclorito de sodio, utilizado para evitar que crezcan organismos en agua, cloruro de hierro y aluminio, utilizados como floculantes, fosfato de sodio, utilizada para evitar atascamientos, ácido clorhídrico, utilizado para ajustar el PH del agua, polímeros orgánicos, poliglicol y cobre entre otros. Debe considerarse que estos agentes suelen tener mayor densidad que el agua, por lo que se disponen en el lecho marino, afectando principalmente a las plantas que en él habitan, las que a su vez sirven de alimento para los peces allí presentes. Por su parte, estos peces y animales también son susceptibles a la salinidad del agua pues, estudios demuestran que cuando esta aumenta más de un 3% respecto a los valores normales, ya se ven afectados negativamente. Finalmente, estudios demuestran que el aumento de la temperatura en más de 1°C, respecto a la temperatura natural del agua, reduce la cantidad de oxígeno presente reduciendo, en definitiva, las posibilidades de la vida en ella. Vale la pena destacar que el principal causante del aumento de la temperatura en la descarga proviene del enfriamiento de la central de generación de energía, y no de la desalinización propiamente dicha.

Para mitigar el efecto negativo en el ecosistema marino de la descarga existen diversas técnicas que suelen aplicarse en la actualidad. En primera instancia, una buena medida es mezclar el condensado con el agua que proviene del enfriamiento de la planta de energía, que, en el caso de ser una central nuclear, será mayor que en una central a gas. De esta forma, se reduce la concentración de sales y sólidos en la descarga, es decir que se diluye. Por otro lado, deben estudiarse las condiciones de las mareas y corrientes en la zona de la descarga pues, bajo condiciones de elevadas mareas, se puede practicar la descarga costera garantizando una buena disolución y dispersión de las sales, minimizando así el impacto en la zona aledaña a la descarga (ver Figura 80). Por otro lado, en la planta de desalinización nuclear Aktau, en Kazajistán, se ha implementado un lago artificial de baja profundidad que permitía la disposición de las sales en el fondo del mismo previamente a la descarga del agua al mar. Sin embargo, debe considerarse que esto fue posible debido a la extensa superficie disponible en zonas aledañas a la planta, y que la capacidad de la planta no era elevada. A pesar de esto, una de las medidas más populares en los últimos años, es la descarga sumergida en zonas profundas de baja actividad biológica. La descarga propiamente dicha se produce con un jet de elevada velocidad a un ángulo entre 30 y 40°, pues se ha estudiado que esto facilita la dispersión y disolución de sólidos, tal como se aprecia en la Figura 81. Respecto a los químicos, debe minimizarse el uso de los mismos mediante un correcto diseño y selección de la obra de toma, por ejemplo, utilizando una toma indirecta. Finalmente, estudios plantean la posibilidad de utilizar métodos que no presenten líquido en la descarga. Los mismos se basan en lograr la evaporación de la salmuera en piletas debidamente diseñadas para evitar que las sales penetren el suelo. Posteriormente, la sal puede ser recogida y utilizada en plantas de sal. Sin embargo, este método requiere de grandes extensiones de tierra para ser aplicado.

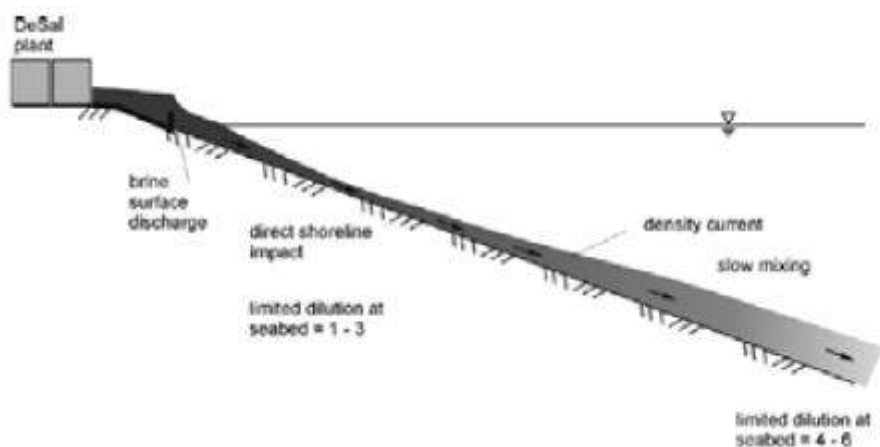


Figura 80 – Esquema de descarga superficial

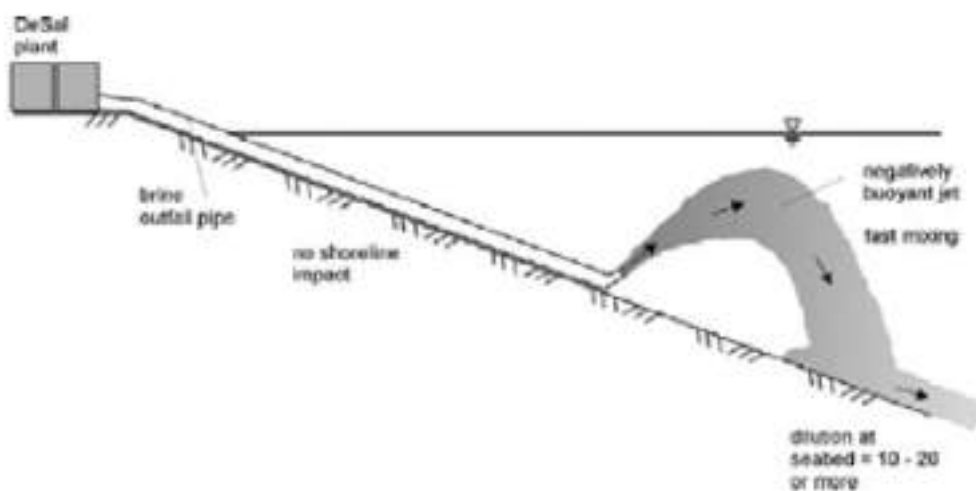


Figura 81 – Esquema de descarga sumergida

Particularmente, y para comprender la magnitud del impacto en los EAU, se estima que anualmente se depositan más de 3 km<sup>3</sup> de salmuera en las aguas del Golfo Pérsico, con una salinidad que varía entre 46 y 80 mil ppm de STD.<sup>168</sup>

### 8.2.3. Otros impactos ambientales

Si bien los principales efectos negativos producidos por la desalinización de agua han sido descritos en las secciones anteriores, existen otros impactos menores que deben ser considerados.

En primera instancia, el proceso constructivo genera un impacto en el ambiente costero, tanto visual como por ruido, debido a la presencia de máquinas, movimientos de suelos, y la ejecución de estructuras civiles. Adicionalmente, producto de la operación de la planta, será esperable mayor tráfico de vehículos y personas en las zonas aledañas. Sin embargo, los proyectos de cogeneración reducen estos impactos al ocupar una menor superficie y, debido a

<sup>168</sup> United Arab Ministry of Environment and Water (2010). *United Arab Emirates – Water Conservation Policy*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moccae.gov.ae](http://www.moccae.gov.ae)(ref.[53]), p.19

que comparten edificios auxiliares, reduciendo el tiempo de construcción, en comparación con la construcción de la planta de generación y desalinización por separado.

Por otro lado, la operación de la planta desalinizadora genera ruido. Por ejemplo, en el caso de una planta RO, se pueden alcanzar hasta 90 dB (A) por la operación de las bombas de alta presión. Las plantas térmicas, MSF y MED, tienen un impacto sonoro considerablemente menor. Adicionalmente, debe considerarse el ruido producido por la fuente de energía, en el caso de una planta de cogeneración. En este aspecto, de las posibles fuentes de energía la eólica es la de mayor impacto, aunque cualquier térmica, sea a gas o nuclear, que utilice torre de enfriamiento también genera ruidos considerables.

Respecto a las descargas atmosféricas, el proceso de desalinización en sí mismo tiene un impacto ambiental despreciable, debiendo considerarse exclusivamente el de la fuente de energía.

### 8.3. Impacto ambiental de la fuente de energía acoplada

#### 8.3.1. Impacto de la generación de energía nuclear

Tal como se ha desarrollado en el capítulo 5.2, el proceso de generación de energía nuclear se produce extrayendo el calor generado en el núcleo, obtenido de la fisión atómica, y no mediante la quema de hidrocarburos, por lo que no se producen emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Existen, sin embargo, otros procesos asociados a este tipo de energía que tienen impacto ambiental, tales como la minería de uranio, el proceso de fabricación del combustible y el tratamiento de los elementos combustibles quemados.

En cuanto al impacto en el terreno natural, la minería para la extracción del uranio genera como todo proceso minero efectos que deben ser considerados, sin embargo, debido a la cantidad necesaria para producir energía, es relativamente menor. Esto se debe a que, en comparación con el carbón, se requiere mucho menos volumen para producir la misma cantidad de energía. Por ejemplo, una pastilla de uranio tiene el poder energético de 500 litros de petróleo. A su vez, la central nuclear propiamente dicha suele ocupar mayor superficie que una central a gas debido a la necesidad de contar con espacio para las piletas que almacenan los elementos combustibles gastados durante la vida útil de la misma. En el caso del CAREM, sin embargo, este aspecto no es tan relevante debido a su diseño integrado donde las piletas, así como la sala de control y otros edificios auxiliares, se encuentran dentro del Edificio del Reactor y, por lo tanto, la superficie requerida para la central es comparable con una de generación térmica convencional.

Las centrales nucleares requieren mayor caudal de agua para enfriamiento, principalmente debido a que tienen menor eficiencia en el proceso térmico. De hecho, las centrales nucleares presentan una tasa de captación de agua entre 95 y 230 m<sup>3</sup>/MWe, mientras que las de gas demandan entre 26 y 76 m<sup>3</sup>/MWe. El impacto que genera la toma y descarga de agua, así como las posibles medidas para mitigarlo, ha sido desarrollado en los capítulos 8.2.1 y 8.2.2.<sup>169</sup>

Por otro lado, suele objetarse como efecto negativo de las liberaciones de radiación. Si bien durante la operación normal las centrales nucleares producen descargas radioactivas al ambiente, las mismas son controladas. Al respecto, Abel González<sup>170</sup> ha presentado ante el Simposio de la *World Nuclear Association* del año 2018, resultados obtenidos por el Comité Científico de Efectos de la Radiación Atómica de las Naciones Unidas (UNSCEAR<sup>171</sup> por sus siglas en inglés) sobre este tema, que en publicaciones recientes afirma que la generación eléctrica mediante energía

<sup>169</sup>International Atomic Energy Agency (2010). *Environmental Impact Assessment Of Nuclear Desalination*, IAEA-TECDOC 1642, Viena, Austria.(ref.[31]), Op. Cit., p.18.

<sup>170</sup> Abel González es asesor de la Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina, representante argentino en la UNSCEAR, miembro de la Comisión de Estándares de Seguridad de la IAEA y miembro de la delegación argentina en la conferencia general de la IAEA.

<sup>171</sup> UNSCEAR proviene de las siglas en inglés de *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*

nuclear produce poco aporte a la exposición global a la radiación. Esta afirmación se sostiene en más de 10 años de medición por parte de la UNSCEAR de las dosis de emisiones de las centrales nucleares, y determina que las mismas, considerando todo el ciclo de combustible nuclear, son menores a 1/10.000 veces que otras fuentes de radiación, ya sea naturales, como la cósmica, o producidas por el hombre, como la medicina nuclear. Asimismo, con los valores de dosis medidos en el ambiente no se puede vincular la exposición crónica a los mismos a efectos adversos en la salud. Adicionalmente, el estudio presentado por la UNSCEAR compara la radiación generada por la operación e instalación de centrales nucleares con las de otras fuentes de generación de energía y, sorprendentemente, los resultados son menores que a las térmicas, en cuanto a la operación, y las solares y eólicas, en la etapa de instalación.<sup>172</sup>

En caso de un accidente, si bien la UNSCEAR, ni ningún otro organismo se atreven a estimar los valores de radiación que se pueden liberar, el comité ha estudiado los efectos de 2 de los 3 accidentes nucleares que hubo: Chernobyl y Fukushima (el restante es Three Mile Island, pero en este caso la liberación de radiación fue despreciable). En el caso de Chernobyl se reportaron 36 muertes por sobreexposición a la radiación de los bomberos que acudieron a apagar el incendio. Adicionalmente, se comprobó que los niños de la región que se alimentaron con leche contaminada presentaban restos de radiación en su organismo. Al margen de esto, a la fecha no hay evidencia de ningún otro efecto sobre la salud debido a este accidente. Respecto a Fukushima no se han detectado víctimas fatales, ni de enfermedades, en los trabajadores o población que fue expuesta a la radiación.<sup>173</sup>

De todas formas, en cada uno de estos accidentes la comunidad nuclear internacional ha compartido conocimientos y experiencias de forma que los causales de uno no se repitan nunca más. De esta forma, los diseños de los reactores han ido ganando en seguridad, tal como se comentó en 5.3.5, llegando el CAREM a ser un reactor intrínsecamente seguro, donde el desprendimiento de material radioactivo en caso de accidente es prácticamente nulo. De hecho, al ser el CAREM un reactor de generación III+, ver 5.3.5, presenta valores de CFD (*Core Frequency Damage*) y LRF (*Large Release Frequency*) tan bajos que equivalen a decir que debería haber 10 millones de CAREM para que ocurra un accidente al año.

Finalmente, durante la operación las centrales nucleares generan desechos radioactivos con distintos niveles de actividad, siendo el combustible quemado el que mayor radiación presenta. Como se ha mencionado anteriormente el CAREM se encuentra diseñado de forma tal de poder contener en sus piletas los elementos combustibles generados durante toda su vida útil. Sin embargo, una vez concluida esta, debe buscarse un lugar de disposición final de los mismos. Este es un tema que la mayoría de países aún no ha resuelto, mientras que USA aún se encuentra en proceso de licenciamiento de un reservorio geológico profundo en Yucca Mountain<sup>174</sup>, en Europa se están construyendo reservorios subterráneos para el almacenamiento final en diversos países, tales como Finlandia y Suecia. Otros países de Europa occidental, como Francia y España, se encuentran aun estudiando las distintas alternativas posibles. Argentina, más específicamente la CNEA, por su parte, tiene plazo hasta el año 2060 para definir la estrategia a adoptar como reservorio final. En el caso de los EAU, aún no hay una definición sobre la estrategia a utilizar, aunque vale la pena destacar que todavía no se ha puesto en marcha el primer reactor nuclear (ver 3.2.2). Es decir que, si bien las medidas adoptadas de almacenamiento en los reactores son provisorias, los tiempos previstos para adoptar reservorios definitivos son extensos,

---

<sup>172</sup> **González, A. (2018).** *Viewpoint: Demystifying radiation - the nemesis of nuclear energy?*, nota publicada por World Nuclear News, 7 Septiembre de 2018. En: <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demystifying-radiation-the-nemesis-of-nuclear-ener>(ref.[15])

<sup>173</sup> *Ibidem.*

<sup>174</sup> Yucca Mountain Project (ref.[81]).



permitiendo realizar todos los estudios necesarios para lograr un diseño seguro y duradero que no ponga en riesgo el medio ambiente.

Otro aspecto muy estudiado es la posibilidad de contaminar el agua tratada con partículas radioactivas. Principalmente, el agente contaminante que mayor daño puede producir a la salud humana es el tritio, isótopo radiactivo del hidrógeno, que se produce en el núcleo del reactor nuclear. Solamente hay presencia de tritio en el *loop* cerrado del agua refrigerante que pasa por el núcleo. Esa agua nunca toma contacto con el agua del circuito secundario (turbina) ni con la planta desalinizadora. Para garantizar que no se produzca contaminación por el mismo, tal como se ha desarrollado en el capítulo 6.2.5, se introduce un *loop* intermedio entre el circuito secundario del reactor y la planta desalinizadora. El *loop* debe tener mayor presión que el circuito secundario, y menor presión que la planta desalinizadora. De esta forma, en caso de pérdida en alguno de ellos, los posibles agentes contaminantes se alejan siempre del agua tratada.

Adicionalmente, debe instalarse un sistema de monitoreo apropiado, que permita controlar permanentemente las condiciones de operación del reactor, tales como la medición de la presión en el *loop* intermedio y la medición de agentes contaminantes en el *loop* intermedio, agua tratada y circuito secundario. Es importante destacar que en la experiencia obtenida en las plantas de desalinización nuclear no se han reportado valores de tritio que superen las admisibles por la Unión Europea, cuyo valor límite es de 100 Bq/L<sup>175</sup>, siendo el más restrictivo del mundo.

### 8.3.2. Impacto de la generación con centrales a gas

El gas natural es considerado el combustible fósil menos contaminante, pues es el que menos gases de efecto invernadero libera durante su combustión. De hecho, al quemarse el gas natural se produce básicamente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y cantidades despreciables de partículas, mercurio, dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), tal como se puede apreciar en la Tabla 19, motivo por el que prácticamente no aporta a la formación de lluvia ácida ni smog. Sin embargo, debe considerarse que, tanto en el proceso de transporte como de combustión de gas, se libera a la atmósfera metano (CH<sub>4</sub>), que es el principal componente del gas natural. A pesar de que las emisiones de metano libres se controlan y regulan, de forma de ser minimizadas, no deja de ser un gas que aporta al calentamiento global, por lo tanto, y debe ser considerado a la hora de evaluar el impacto ambiental de este combustible.

<u>Pollutant</u>	<u>Natural Gas</u>	<u>Oil</u>	<u>Coal</u>
<u>Carbon Dioxide</u>	117,000	164,000	208,000
<u>Carbon Monoxide</u>	40	33	208
<u>Nitrogen Oxides</u>	92	448	457
<u>Sulfur Dioxide</u>	1	1,122	2,591
<u>Particulates</u>	7	84	2,744
<u>Mercury</u>	0.000	0.007	0.016

**Tabla 19 – Emisiones de la combustión de combustibles fósiles (libras por mil millones de BTU)<sup>176</sup>**

<sup>175</sup> El becquerel o becquerelio (símbolo Bq) es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades que mide la actividad radiactiva.

<sup>176</sup> Fuente: <http://naturalgas.org/environment/naturalgas/> (acceso el 29/01/2019)

Respecto al impacto de los gases en la atmósfera, el Protocolo de Kyoto, adoptado en el año 1997, ha identificado 6 gases como las principales causales del cambio climático, dentro de los cuales los 2 más relevantes son el CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, precisamente los gases destacados en el párrafo anterior. Para medir la relevancia relativa de estos gases, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC<sup>177</sup>) ha introducido el concepto de Potencial de Cambio Climático (GWP<sup>178</sup>) que establece el efecto de los gases en el tiempo que permanecen en la atmósfera desde el momento que son emitidos. El Potencial de Cambio Climático Absoluto (AGWP<sup>179</sup>), por su parte, es el valor integrado para cada uno de los horizontes de tiempo considerados.<sup>180</sup>

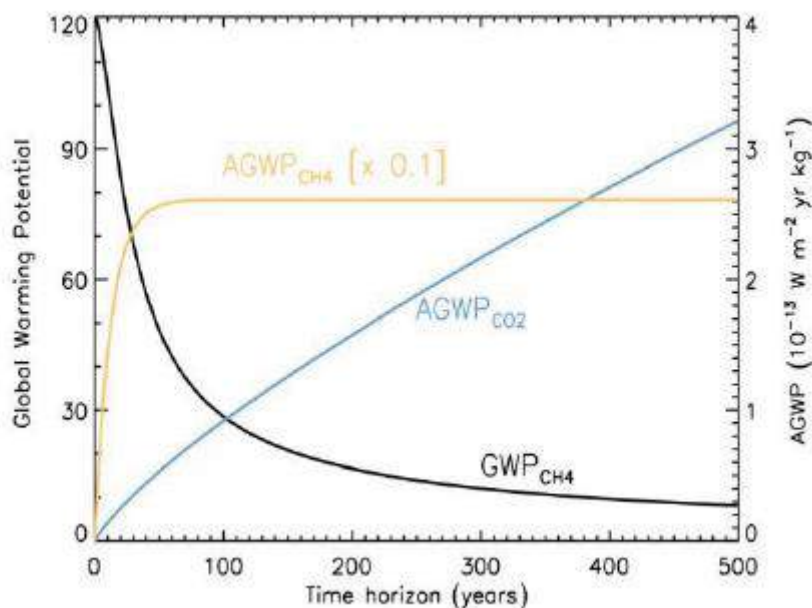


Figura 82 – GWP del metano, en función del tiempo de horizonte<sup>181</sup>

En la Figura 82 se puede apreciar el AWGP y GWP del metano y dióxido de carbono. En primera medida, se observa que el metano tiene un GWP muy elevado en el corto plazo, que decrece exponencialmente a medida que el período considerado es mayor. Esto se debe a que mediante procesos naturales reacciona con los radicales hidroxilos (OH) libres en la atmósfera, hasta llegar a un valor asintótico. En cuanto al AWGP, es decir integrándolo en el tiempo considerado, se observa que, el hecho de que el potencial de cambio climático del metano disminuya drásticamente, hace que luego de un crecimiento exponencial se mantenga casi constante a lo largo de los años. El dióxido de carbono, por su parte, tiene un GWP un orden de magnitud menor, aunque se aprecia que con el paso del tiempo no alcanza valores asintóticos, por lo que continúa en la atmósfera reteniendo calor.<sup>182</sup>

<sup>177</sup> IPCC proviene de las siglas en inglés de *Intergovernmental Panel on Climate Change*

<sup>178</sup> GWP proviene de las siglas en inglés de *Global Warming Potential*

<sup>179</sup> AGWP proviene de las siglas en inglés de *Absolute Global Warming Potential*

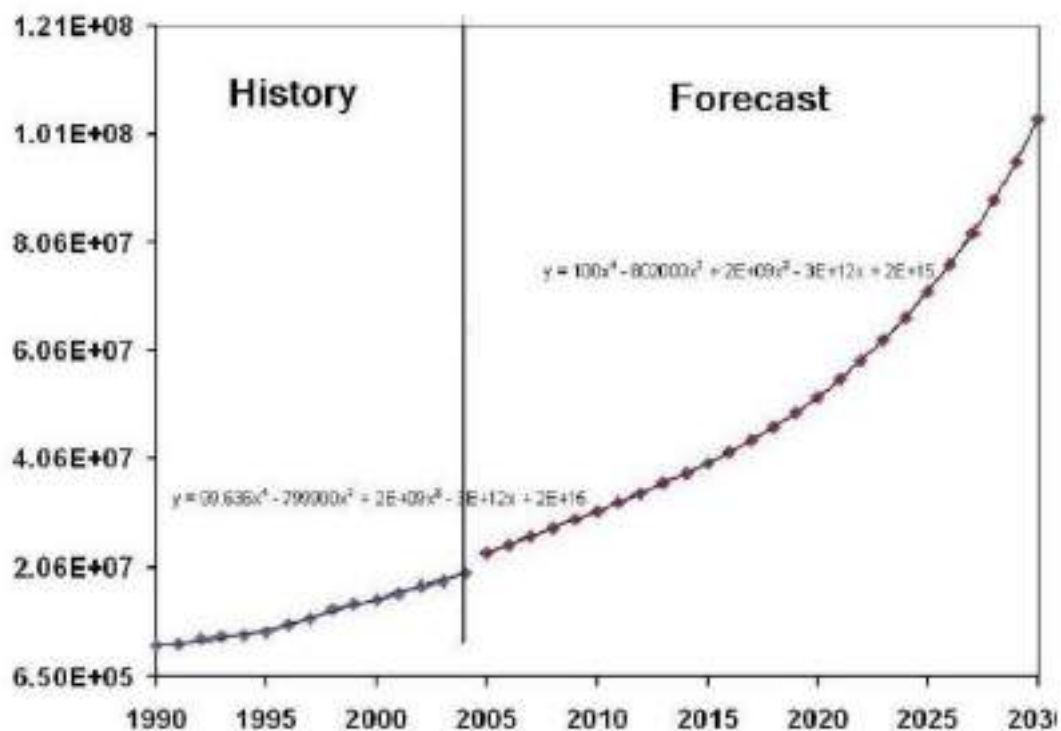
<sup>180</sup> <http://www.cambioclimatico.org/tema/protocolo-de-kyoto> (acceso el (31/01/2019)

<sup>181</sup> Alonso, A., Brook, B., Meneley, D., Misak, J., et al. (2015). *Why nuclear energy is essential to reducing anthropogenic greenhouse-gas Emission rates*, paper presentado en Proceedings of ICAPP '15, 3-6 Mayo de 2015, Niza, Francia.(ref.[4])

<sup>182</sup> *Ibidem*.

Para poder contemplar el efecto de ambos gases, es decir dióxido de carbono y el metano de pérdida, o fugitivo, el IPCC ha introducido el concepto de Emisión de Dióxido de Carbono Equivalente, que es la cantidad de CO<sub>2</sub> que causaría el mismo efecto que la suma de la combinación de ambos gases. De esta forma, por ejemplo, se puede comparar el efecto de centrales a gas y centrales a carbón, llegando a la conclusión de que, para que realmente las centrales a gas presenten efectos positivos en el cambio climático respecto al carbón, las pérdidas de metano deben ser menores al 2% del que es quemado.<sup>183</sup>

Como ejemplo de la cantidad de gases emitidos en un proceso de uso intensivo de la energía, como lo es la desalinización de agua, basta mencionar que el mismo, alimentado mayoritariamente mediante ciclos térmicos a gas, es la segunda actividad que mayor cantidad de gases de efecto invernadero libera entre los países del Golfo Pérsico. En la Figura 83 se puede observar las proyecciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a la desalinización de agua, en Abu Dhabi. Ante estas proyecciones, resulta necesario pensar en fuentes energéticas no contaminantes, y que abastezcan de forma constante el proceso de tratamiento de agua, como reemplazo de los hidrocarburos, resultando la energía nuclear la indicada para hacerlo.<sup>184</sup>



**Figura 83 – Proyección de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a desalinización de agua en Abu Dhabi (Eje Y: toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas)<sup>185</sup>**

Por otro lado, estudios demuestran que, en el futuro, exclusivamente para la zona del Mediterráneo, se necesitará una producción adicional de 10 millones de m<sup>3</sup>/día de agua dulce. Si dicha producción se alimentara con energía nuclear, en lugar de fósil, el medio ambiente percibiría

<sup>183</sup> Ibídem.

<sup>184</sup> Dawoud, M. y Al Mulla, M. (2012). *Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study*, International Journal of Environment and Sustainability, Vol. 1, N° 3, SCIENCE TARGET, pp. 22-37.(ref.[9])

<sup>185</sup> Ibídem.

200 millones de t/año menos de CO<sub>2</sub>, 200 mil toneladas t/año menos de SO<sub>2</sub> y 60 mil t/año menos de NO<sub>x</sub>.

Finalmente, a todo lo mencionado debe considerarse el impacto ambiental producido por el proceso de transporte y extracción de gas, más aún en los EAU donde se utiliza el *fracking* como método de extracción. A diferencia de las formas de extracción convencionales, el *fracking* extrae el gas retenido en los poros de las rocas rompiéndolas mediante la inyección de agua a elevada presión. Si bien este tema no se desarrollará en detalle, basta mencionar algunos de los efectos negativos del proceso, tales como construcción de plataformas de explotación, demanda intensiva de agua para romper las rocas, contaminación de napas de agua con los químicos utilizados para la fractura de la piedra, liberación de metano, etc.

#### **8.4. Conclusiones**

De lo analizado en el presente capítulo se puede concluir que los impactos ambientales propios de la desalinización de agua son prácticamente independientes a la fuente de energía que utilicen, con la excepción del mayor caudal de agua requerida por la energía nuclear. Sin embargo, esto puede ser mitigado en la toma de agua mediante un correcto diseño de la toma y la descarga. Adicionalmente debe considerarse que ese mayor caudal tiene un efecto positivo en la disolución de condensado en la descarga.

Respecto a la generación de energía propiamente dicha, la energía nuclear presenta una opción altamente sustentable frente a la combustión de cualquier combustible fósil por no liberar gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se ha demostrado también que el impacto ambiental por el proceso de extracción y combustión del gas natural, aun siendo el hidrocarburo que menos efectos adversos tiene, es considerable en cuanto a su aporte a los gases de efecto invernadero. En otras palabras, es factible desde el punto de vista ambiental la utilización de la energía nuclear en general, y del CAREM en particular, para la alimentación de energía de las plantas desalinizadoras.

## 9 CONCLUSIONES

### 9.1. Conclusiones

La falta de agua es uno de los principales problemas que aqueja a la humanidad y a pesar de los estudios y programas de distintos organismos internacionales, como las Naciones Unidas, IAEA y *World Resource Institute*, entre otros, las proyecciones indican que la escasez de agua aumentará drásticamente en los próximos 30 años. Durante el desarrollo de la tesis, específicamente en el capítulo 2, se han definido los términos que permiten entender esta problemática y ha quedado manifestada claramente la gravedad de la misma, no solo hoy en día, sino que también proyectada hacia el futuro. Por otro lado, en base a los aspectos económicos, políticos, geográficos y energéticos de los países que se estima presentarán mayor estrés hídrico a futuro, se ha seleccionado a los Emiratos Árabes Unidos como el que cuenta con mayor potencialidad para instalar un proyecto de desalinización nuclear. Sin embargo, al margen de los Emiratos Árabes Unidos, hay numerosos países que resultan similares en cuanto a la consideración, al menos mediante la matriz de selección elaborada, para implementar también un proyecto de desalinización nuclear, o que al menos ameritan profundizar los estudios al respecto. Tal es el caso de Arabia Saudita, Singapur, Qatar o España, que han obtenido elevado puntaje en la matriz presentada en el ANEXO A.

Una vez seleccionado el país, el estudio de las condiciones socioeconómicas ha permitido entender el crecimiento demográfico que han evidenciado los EAU en los últimos años, así como la proyección poblacional a futuro, lo que, en definitiva, implica mayor consumo de energía y agua. En el caso de este último recurso, considerando la escasez que presenta el país, resulta evidente que se debe seguir profundizando la desalinización, rubro en el que es el segundo mayor productor mundial, como fuente de suministro de agua potable a la población y de calidad apta para la industria. Por otro lado, la matriz energética del país demuestra la dependencia casi total del gas natural, siendo, de hecho, importadores de dicho hidrocarburo. Por tal motivo, los planes energéticos a futuro ilusionan con políticas y objetivos que buscan la diversificación de la matriz, aumento de la eficiencia energética, y más específicamente, aumento de la participación de la energía nuclear. Esto permite tomar como válida la hipótesis de la viabilidad de la instalación de un reactor CAREM en el país, aspecto fundamental para la factibilidad técnica, económica y ambiental que se desea probar.

Adicionalmente, al conjugar las zonas con mayor densidad demográfica del país, en el sector noroeste, con aquellas de menor riesgo sísmico, en Abu Dhabi, el estudio ha permitido obtener conclusiones respecto a la mejor zona para implantar un proyecto de desalinización nuclear. De hecho, es en este emirato donde se están construyendo actualmente los reactores nucleares de potencia del país, más precisamente en Barakah.

Por su parte, en el capítulo 4 se estudiaron las principales características de los procesos de desalinización térmicos, de membrana e híbridos. En base a esto ha quedado evidenciado cómo la ósmosis inversa es el proceso que ha sido mayoritariamente seleccionado para proyectos de desalinización en los últimos años, tanto en el mundo como en los nuevos proyectos en EAU, desplazando así la supremacía presentada durante décadas por el MSF. Esto se debe a que los procesos de membrana son más eficientes energéticamente y presentan menor costo de instalación, así como mayor flexibilidad en el diseño de la planta. La principal desventaja del RO, que está relacionada con la durabilidad y costo de las membranas, ha sido mitigada sustancialmente mediante avances tecnológicos en los últimos años, motivando el cambio anteriormente mencionado.

A su vez, la tesis ha permitido obtener conocimientos básicos de la energía nuclear, abarcando desde la fisión del núcleo hasta los distintos tipos y generalidades de los reactores nucleares, aportando una base teórica sólida, y necesaria, para poder comparar los distintos tipos de SMR. Por otro lado, se han presentado las ventajas de los reactores modulares, su historia y proyección en el tiempo, así como los proyectos que, junto con el CAREM, se encuentran en etapa

de diseño. Se han detallado las características innovativas de diseño del CAREM, y se las ha comparado con los diseños de SMR que se encuentran en construcción, o en etapa avanzada de diseño, en cuanto a sus características principales de diseño, sistemas de seguridad y costo de generación de energía declarado. La comparación ha arrojado como resultado evidentes ventajas del CAREM en cuanto a las medidas de seguridad pasivas con las que cuenta, y sobre todo la circulación natural del circuito primario. Vale la pena aclarar que el diseño del NuScale presenta conceptos que son igual, o hasta más innovadores, pero que aún no han sido probados, y como proyecto se encuentra considerablemente más atrasado que el CAREM25, actualmente en construcción. En definitiva, puede concluirse que el CAREM se presenta como una de las mejores opciones frente a los otros diseños de SMR.

Adicionalmente se introdujo el concepto de desalinización nuclear, así como las ventajas asociadas, para cada tipo de acoplamiento y proceso de desalinización. A partir de allí, y en base a conclusiones de estudios realizados previamente, se ha analizado la factibilidad técnica de acoplar el CAREM para plantas RO, MSF, MED e híbridas, resultando en todos los casos posible, aunque con mejores resultados para las híbridas conformadas por MED + RO. Vale la pena aclarar que, a modo general las ventajas que se han estudiado en las plantas híbridas son tan contundentes que las posiciona a futuro como una de las tipologías que aumentará considerablemente su incidencia en el mercado. Principalmente se destaca que reúne las ventajas de ambos métodos, térmicos y de membrana, reduciendo significativamente los costos de operación, y el hecho de que permite obtener distintas calidades de agua, lo que lo hace apto para la industria y el consumo domiciliario. Finalmente, luego de vincular estas cuestiones técnicas de procesos con conclusiones obtenidas en el estudio de los EAU en capítulos anteriores, tales como política de abastecimiento de agua, política energética a futuro, instituciones nucleares presentes en el país, crecimiento del consumo de agua, entre otros, se ha concluido que es técnicamente factible instalar un reactor CAREM para abastecer una planta híbrida (RO + MED) en la región de Barakah.

Estas conclusiones obtenidas en el capítulo de factibilidad técnica han proporcionado la información necesaria para poder proyectar una planta híbrida acoplada al CAREM480 conociendo sus consumos eléctricos y térmicos. De esta forma, para evaluar la factibilidad económica, se ha podido aplicar un modelo simplificado de comparación del VAN de un proyecto de generación mediante CAREM480 y otro de un CCG de potencia equivalente, restando en ambos casos la potencia eléctrica y térmica consumida por el proceso de desalinización. Los resultados obtenidos, han demostrado que con los valores actuales del precio del gas natural el proyecto de desalinización arroja un VAN un 30% mayor al considerar un CCG que el CAREM480, como fuente de alimentación de energía. Sin embargo, también se han presentado estudios de sensibilidad del cálculo del VAN introduciendo variaciones al precio del gas, fluctuaciones que por cierto responden a la historia reciente del precio del hidrocarburo en cuestión, y las rentabilidades obtenidas han sido prácticamente iguales. Finalmente, se han presentado las distintas externalidades y efectos intangibles, que deben ser considerados en proyectos originados con fondos públicos, como lo sería en el caso de los EAU, donde la generación está monopólicamente controlada por los distintos emiratos, y los resultados fueron ampliamente favorables hacia la generación nuclear. Por lo tanto, y a la vista de los argumentos presentados se concluye que es económicamente factible utilizar el CAREM480 para la desalinización de una híbrida (RO+ME) en los Emiratos Árabes Unidos.

Para concluir el estudio, se ha abordado la factibilidad ambiental de la utilización del CAREM480, frente a la de un CCG, para alimentar una planta desalinizadora de agua. De lo analizado, y tal como se mencionó en la sección 8.4, se puede concluir que los impactos ambientales propios de la desalinización de agua son prácticamente independientes a la fuente de energía que utilicen. Respecto a la generación de energía propiamente dicha, la energía nuclear presenta una opción altamente sustentable frente a la combustión de cualquier combustible fósil por no liberar gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se ha demostrado también que el impacto ambiental por el proceso de extracción y combustión del gas natural, aun siendo el

hidrocarburo que menos efectos adversos tiene, es considerable en cuanto a su aporte a los gases de efecto invernadero. En otras palabras, es factible desde el punto de vista ambiental la utilización de la energía nuclear en general, y del CAREM en particular, para la alimentación de energía de las plantas desalinizadoras.

Por lo tanto, se puede afirmar que tanto el objetivo general de la tesis (ver 1.2.1), como los particulares (ver 1.2.2), han sido satisfactoriamente cumplidos, siendo por lo tanto el CAREM, factible técnica, económica y ambientalmente para desalinizar agua en los Emiratos Árabes Unidos.

Queda pendiente para futuros estudios los detalles que deben incluirse en un acuerdo bilateral, técnico y comercial, entre ambos países para poder materializar la exportación y construcción del primer reactor argentino en los EAU.



## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Abu Dhabi Distribution Co. (2017)**. *Water and Electricity Tariffs 2017*, En <https://www.addc.ae>
- [2] **Africa Climate Change, Energy and Security (ACCES) Dialogue Process (2010)**. *Climate Change and Security in Africa*, Bruselas, Bélgica.
- [3] **Agrawal, R. (2016)**. *Electricity Regulation in the United Arab Emirates: overview*, Thompson Reuters Practical Law, en: <https://content.next.westlaw.com/>
- [4] **Alonso, A., Brook, B., Meneley, D., Misak, J., et al. (2015)**. *Why nuclear energy is essential to reducing anthropogenic greenhouse-gas Emission rates*, paper presentado en Proceedings of ICAPP '15, 3-6 Mayo de 2015, Niza, Francia.
- [5] **Autoridad Regulatoria Nacional (2002)**. **AR 3.10.1: Protección contra terremotos en reactores nucleares de potencia**, Febrero de 2002. En: [www.arn.gov.ar](http://www.arn.gov.ar)
- [6] **Al-Karaghoul, A. y Kazmerski, L. (2012)**. *Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling*. Paper presentado en conferencia Proceedings of the World Renewable Energy Forum, 3-17 Mayo de 2012, Denver, Colorado.
- [7] **Bin Marshad, S. M., (2014)**. *Economic evaluation of seawater desalination: A case study analysis of cost of water production from seawater desalination in Saudi Arabia*, Tesis de Doctorado en School of Built Environment, Edimburgo, Reino Unido.
- [8] **Calzetta Larriou, O. (2014)**. *CAREM Project*, presentación realizada en Simposium Small Modular Reactors For Nuclear Power, Julio 2014, Río de Janeiro, Brasil.
- [9] **Dawoud, M. y Al Mulla, M. (2012)**. *Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study*, International Journal of Environment and Sustainability, Vol. 1, N° 3, SCIENCE TARGET, pp. 22-37.
- [10] **De Arenaza, I. y Cattaneo J. (2014)**. *An overview of the first Argentinean NPP containment design*, artículo presentado en Conferencia TINCE 2014, 1-4 de Septiembre de 2014, París, Francia.
- [11] **Delmastro, D., Gómez, S., Mazzi, R., Gómez de Soler, S. et al (2010)**. *Características Generales del Reactor CAREM25*, en: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/32/068/32068427.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/068/32068427.pdf?r=1&r=1)
- [12] **Dubai Statics Center (2015)**. *Population Bulletin, Emirate of Dubai, 2015*, Emiratos Árabes Unidos. En: <https://www.dsc.gov.ae>
- [13] **Gil Posadas, Delmastro D, Di Pace, M, Chocron, M., et al. (2017)**. *Central Nuclear CAREM – Escala Comercial*, Revista de la CENA, N° 67-68, Diciembre 2017, Buenos Aires, Argentina.
- [14] **Glasstone, S. y Sesonske, A. (1990)**. *Ingeniería en Reactores Nucleares*, Editorial Reverté, Barcelona, España.
- [15] **González, A. (2018)**. *Viewpoint: Demystifying radiation - the nemesis of nuclear energy?*, nota publicada por World Nuclear News, 7 Septiembre de 2018. En: <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demystifying-radiation-the-nemesis-of-nuclear-ener>
- [16] **Hameeteman, E. (2013)**. *Future water (in)security: facts, figures and predictions*, Global Water Institute, 2013

- [17] **Hoekstra, A. y Chapagain, A. (2007)**, *Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern*, publicado en Libro Water Resource Manage (2007), pp. 35-48
- [18] **Hum Jung, Y. y Hoon Jeong, Y. (2015)**. *Optimum Design of Cogeneration System for Nuclear Seawater Desalination*, paper presentado en Proceedings of ICAPP '15, 3-6 Mayo de 2015, Niza, Francia.
- [19] **Higa, M. (2012)**. *Una mirada a las generaciones de reactores nucleares de potencia*, Publicado en libro Hojitas de Conocimiento, Edición 2012, Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, CNEA, Buenos Aires, Argentina.
- [20] **International Atomic Energy Agency (1990)**. *Use of nuclear reactors for seawater desalination*, IAEA-TECDOC 574, Viena, Austria.
- [21] **International Atomic Energy Agency (1996)**. *Potential for nuclear D¿desalination as a source of low cost potable wáter in North Africa* , IAEA-TECDOC 917, Viena, Austria.
- [22] **International Atomic Energy Agency (2000)**. *Introduction of Nuclear Desalination*, IAEA-TRS 400, Viena, Austria.
- [23] **International Atomic Energy Agency (2001)**. Safety aspects of nuclear plants coupled with seawater desalination units, IAEA-TECDOC 1235, Viena, Austria.}
- [24] **International Atomic Energy Agency (2001)**. *INDAG Newsletter*, INDAG Newsletter N°1, Viena, Austria.
- [25] **International Atomic Energy Agency (2002)**. *Status of design concepts of nuclear desalination plants*, IAEA-TECDOC 1326, Viena, Austria.
- [26] **International Atomic Energy Agency (2002)**. *Market Potential for Non-electric Application of Nuclear Energy*, IAEA-TRS 410, Viena, Austria.
- [27] **International Atomic Energy Agency (2005)**. *Optimization of the coupling of nuclear reactors and desalination systems. Final report of a coordinated research Project 1999–2003*, IAEA-TECDOC 1444, Viena, Austria.
- [28] **International Atomic Energy Agency (2007)**. *Status of Nuclear Desalination in IAEA Member States*, IAEA-TECDOC 1524, Viena, Austria.
- [29] **International Atomic Energy Agency (2007)**. *Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specific Studies*, IAEA-TECDOC 1561, Viena, Austria.
- [30] **International Atomic Energy Agency (2009)**. *News from the Technical Working Group on Nuclear Desalination*, N° 1, Septiembre de 2009, Viena, Austria.
- [31] **International Atomic Energy Agency (2010)**. *Environmental Impact Assessment Of Nuclear Desalination*, IAEA-TECDOC 1642, Viena, Austria.
- [32] **International Atomic Energy Agency (2010)**. *News from the Technical Working Group on Nuclear Desalination*, N° 2, Septiembre de 2010, Viena, Austria.
- [33] **International Atomic Energy Agency (2011)**. *News from the Technical Working Group on Nuclear Desalination*, N° 3, Septiembre de 2011, Viena, Austria.
- [34] **International Atomic Energy Agency (2015)**. *New Technologies for Seawater Desalination using Nuclear Energy*, IAEA-TECDOC 1753, Viena, Austria.
- [35] **International Atomic Energy Agency (2015)**. *Country Nuclear Profiles, United Arab Emirates*, Edición 2015, Viena, Austria.
- [36] **International Atomic Energy Agency (2016)**. *Advances in Small Modular Reactors Technology Developments*, Edición 2016, Viena, Austria.
- [37] **International Atomic Energy Agency (2017)**. *Nuclear Power Reactors in the World*, Edición 2017, IAEA-RDS N°2, Viena, Austria.

- [38] **International Atomic Energy Agency (2018)**. *Advances in Small Modular Reactors Technology Developments*, Edición 2018, Viena, Austria.
- [39] **International Desalination Association (2015)**. *Desalination Water Report 2015*
- [40] **Karagiannis, I. y Soldatos, P. (2007)**. *Water desalination cost literatura: review and assesment*. Presentado en European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH), 22-25 Abril de 2007, Volumen 223, 448-56, Halkidiki, Grecia,
- [41] **Khodarev, E. (1978)**. *Los reactores reproductores rápidos de metal líquido*, publicado en Boletín OIEA Vol. 20, n° 6, OIEA.  
En: <https://www.iaea.org/publications/magazines/bulletin/>
- [42] **Knief, R. (1994)**. *Nuclear Engineering, Theory and Technology of Commercial Nuclear Power*, Editorial Taylor & Francis, Mechanisburg, Pennsylvania, USA.
- [43] **Masdar (2017)**. *Renewable energy water desalination programme, the new frontier of sustainable water desalination*. Octubre de 2017. En <https://masdar.ae/>
- [44] **Matthew, F. (2016)**. *For UAE, hope in Deep wáter desalination*, nota publicada en Gulf News el 28 de Septiembre de 2016.
- [45] **Monserat F. (2014)**. *Clase de Energía Nuclear*, presentación realizada en Maestría de Energía del CEARE, Buenos Aires, Argentina.
- [46] **Ramilo, L., Gómez de Soler, S. y Coppari N. (2003)**. *Tecnologías de proceso para desalinización de aguas*. Revista de la CNEA, N° 3, Abril de 2003, 22-27.
- [47] **Singh Mehta, J. (2014)**. *A Comparative Study of Sea Water Desalination Technologies Driven By Solar Power. Impending Power Demand and Innovative Energy Paths*, Tomo I, 146-53. India.
- [48] **The Cooperation Council for the Arab States of the Gulf (GCC) General Secretariat (2014)**. *Desalination in the GCC. The history, the present & the future*, Riad, Arabia Saudita.
- [49] **Travers, W. (2012)**. *A newcomer's regulatory response to the Fukushima accident*. *Presentación realizada en Fukushima Ministerial Conference on Nuclear Safety*, Federal Autorithy for Nuclear Regulation, 15-17 Diciembre de 2012, Emiratos Árabes Unidos.
- [50] **United Arab Ministry of Economy (2017)**. *Annual Economic Report 2017*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.economy.gov.ae](http://www.economy.gov.ae)
- [51] **United Arab Ministry of Energy (2016)**. *UAE State of Energy Report 2016*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moei.gov.ae](http://www.moei.gov.ae)
- [52] **United Arab Ministry of Energy (2017)**. *UAE State of Energy Report 2017*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moei.gov.ae](http://www.moei.gov.ae)
- [53] **United Arab Ministry of Enviroment and Water (2010)**. *United Arab Emirates – Water Conservation Policy*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moccae.gov.ae](http://www.moccae.gov.ae)
- [54] **United Arab Ministry of Enviroment and Water (2017)**. *State of Enviroment Report, United Arabs Emirates 2017*, Emiratos Árabes Unidos. En: [www.moccae.gov.ae](http://www.moccae.gov.ae)
- [55] **United Nations Water (2012)**. *Managing wáter under uncertainty and risk*, United Nations World Water Development Report 4, Volume 1, París, Francia.
- [56] **United Nations Water (2015)**. *Water for a Sustainable World*, United Nations World Water Development Report 2015, París, Francia
- [57] **United Nations Water (2016)**. *Annual Report 2016*, París, Francia
- [58] **United Nations Water (2017)**. *Aguas Residuales, El recurso desaprovechado*, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, París, Francia.
- [59] **Van Straaten, H. y Mazzaccone, A. (2016)**. *Estudio técnico económico de sistemas de desalinización y usos del vapor acoplados a centrales nucleares de baja*

potencia. *Estudio de la desalinización de agua de mar por destilación multiefecto y ósmosis inversa*, Tesis de grado de ingeniería industrial de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

[60] **Veaute, L. (1994).** *Generación de Energía Eléctrica*, Ediciones Homo Sapiens, Rosario, Argentina.

[61] Web de Advanced Reactors Information System (ARIS), de AIEA: <https://aris.iaea.org/>

[62] Web de Abu Dhabi Water & Electricity Company (ADWEC): <http://www.adwec.ae/>

[63] Web de AQUASTAT, de FAO:

[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/ARE/](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/ARE/)

[64] Web de Department of Energy, UAE: <http://www.doe.gov.ae/>

[65] Web de Enciclopedia Británica: <https://www.britannica.com>

[66] Web de Energía Nuclear: [www.energía-nucler.net](http://www.energía-nucler.net)

[67] Web de European Nuclear Society (ENS): [www.euronuclear.org](http://www.euronuclear.org)

[68] Web del Global Water Institute (WGI): <https://gwiwater.org>

[69] Web de International Atomic Energy Agency: [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

[70] Web de International Desalination Association (IDA): <https://idadesal.org>

[71] Web de Power Reactor Information System (PRIS), de AIEA: <https://pris.iaea.org/PRIS/>

[72] Web de Sub Secretaría de Energía Nuclear:

<https://www.argentina.gob.ar/energía/energía-eléctrica/nucler>

[73] Web de The World Bank: <https://databank.worldbank.org>

[74] Web de Trading Economics: <https://tradingeconomics.com/>

[75] Web de US Energy Information Administration (EIA): <https://www.eia.gov/>

[76] Web de Water Fanack: <https://water.fanack.com/>

[77] Web de Water Footprint: <https://waterfootprint.org>

[78] Web de World Nuclear Association (WNA): <http://www.world-nuclear.org>

[79] Web de World Population Review: <http://worldpopulationreview.com/>

[80] Web de World Resources Institute (WRI): <http://www.wri.org/>

[81] Web de Yucca Mountain Project: <http://www.yuccamountainproject.org/>

[82] **World Resources Institute (2015).** *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings*, Technical Note, Agosto de 2015. En: <http://www.wri.org/sites/default/files/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf>

## 11 INDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ECUACIONES

### 11.1. Índice de Figuras

Figura 1 – Disponibilidad de agua dulce en el mundo .....	11
Figura 2 – Recursos hídricos renovables per cápita, en m <sup>3</sup> , en el año 2013.....	12
Figura 3 – Cambios pronosticados en la frecuencia de inundaciones.....	12
Figura 4 – Huella hídrica promedio por persona, por año, por país. ....	13
Figura 5 – Destino de las extracciones de agua dulce .....	13
Figura 6 – Población mundial en los últimos 12.000 años y proyectada al 2100 .....	14
Figura 7 – Cantidad de meses por año en el que volumen de agua superficial y subterránea que se extrae y no se devuelve es mayor al 100% .....	15
Figura 8 – Estrés hídrico por país .....	16
Figura 9 – Estrés Hídrico, por país, hacia el año 2040 .....	16
Figura 10 – Mapa de Emiratos Árabes Unidos (EAU) .....	21
Figura 11 – Disposición de los EAU en el Golfo Pérsico .....	22
Figura 12 – Evolución curva demográfica EUA .....	23
Figura 13 – Distribución étnica de EAU, en el año 2009 .....	23
Figura 14 – Distribución de población dentro de EAU .....	24
Figura 15 – Riesgo Sísmico en EAU .....	25
Figura 16 – Variación del PBI en EAU .....	26
Figura 17 – Tipos de acuíferos .....	28
Figura 18 – Distribución de plantas desalinizadoras en EAU .....	30
Figura 19 – Consumo de agua en EAU por actividad, por año .....	31
Figura 20 – Capacidad de generación instalada y consumo de electricidad en los EAU, año 2016 .....	32
Figura 21 – Ubicación de Barakah.....	33
Figura 22 – Evolución de la capacidad instalada (comisionada y con contrato firmada) de desalinización de agua, a nivel mundial, hasta el año 2015.....	34
Figura 23 – Capacidad de desalinización global por país entre el año 2010 y 2016 .....	35
Figura 24 – Capacidad de desalinización global por tecnología (año 2012) .....	35
Figura 25 – Porcentaje de incidencia de cada tecnología en la capacidad de desalinización del Golfo Pérsico (año 2012) .....	36
Figura 26 – Tecnologías de desalinización de agua.....	37
Figura 27 – Esquema de desalinización mediante MSF.....	38
Figura 28 – Esquema de desalinización simple.....	39
Figura 29 – Esquema de cogeneración industrial en una central térmica de ciclo combinado .....	40
Figura 30 – Esquema de desalinización mediante MED .....	41
Figura 31 – Esquema de desalinización mediante VC, con compresor mecánico.....	43
Figura 32 – Esquema de proceso de ósmosis inversa .....	44
Figura 33 – Esquema conceptual de un sistema de ósmosis inversa .....	45
Figura 34 – Intercambio iónico en una unidad de ED .....	46
Figura 35 – Esquema de planta híbrida simple, entre MSF y RO. ....	48
Figura 36 – Esquema de planta híbrida integrada, entre MSF, RO y nanofiltración. ....	49
Figura 37 – Capacidad instalada (en millones de galones imperiales por año) en EAU.....	50
Figura 38 – Capacidad instalada por tecnología en EAU .....	50
Figura 39 – Variación de energía de enlace por nucleón con el número másico.....	53
Figura 40– Proceso de fisión del núcleo de un átomo de Uranio 235 .....	54
Figura 41 – -Reserva mundial de uranio a 130 U\$S /ton.....	55
Figura 42 – Ciclo Rankine .....	56
Figura 43 – Esquema de un reactor nuclear.....	57
Figura 44 – -Esquema de un PWR .....	58
Figura 45 – Cantidad de reactores en operación, por país, a noviembre de 2016.....	60
Figura 46 – Cantidad de reactores en construcción, por tipo de reactor .....	60
Figura 47 – Generación de reactores a lo largo de los años .....	61

Figura 48 – Configuración típica del circuito primario de un PWR .....	65
Figura 49 – Configuración del circuito primario del CAREM.....	65
Figura 50 – Sistemas de seguridad del CAREM.....	66
Figura 51 –Elemento combustible del CAREM.....	67
Figura 52 – Render de la Central CAREM25 .....	67
Figura 53 – Ubicación de la contención en la Central CAREM25 .....	68
Figura 54 – Layout conceptual del CAREM480 .....	69
Figura 55 – Esquema de planta nuclear alimentada con KLT-40S .....	70
Figura 56 – Esquema de reactor KLT-40S .....	71
Figura 57 – Esquema de reactor RITM-200.....	73
Figura 58 – Esquema del HTR-PM: a) Corte transversal. b) Vista en planta .....	74
Figura 59 – Esquema del Reactor ACPR50S .....	75
Figura 60 – Recipiente de presión del SMART .....	77
Figura 61 – Módulo de NuScale.....	78
Figura 62 – Corte longitudinal de una Central NuScale.....	79
Figura 63 –Acoplamiento típico entre un reactor nuclear y una planta MED .....	80
Figura 64 –Acoplamiento eléctrico y térmico con una planta RO .....	83
Figura 65 –Esquema de PWR con valores de P y T en cada <i>loop</i> .....	84
Figura 66 – <i>Loop</i> intermedio de aislación entre el reactor de generación de calor y la planta MSF85	
Figura 67 – <i>Loop</i> intermedio de aislación entre el reactor de generación de calor y la planta MED .....	85
Figura 68 – Acoplamiento en serie entre un reactor de cogeneración y una planta MSF .....	86
Figura 69 – BOP del CAREM en cogeneración con una planta RO.....	89
Figura 70 – Esquema de CAREM25 acoplado a una planta MED .....	90
Figura 71 – Acople óptimo para una planta desalinizadora híbrida RO + MED, utilizando el CAREM25 .....	91
Figura 72 – Proyección del precio del gas, según el World Bank, en \$/MMbtu .....	96
Figura 73 – Flujo de Fondos actualizados (\$ vs período) para el CCG.....	98
Figura 74 – Flujo de Fondos actualizados (\$ vs período) para el CAREM .....	100
Figura 75 – Evolución del precio del gas natural Henry Hub en \$/mmBTU .....	101
Figura 76 – Costos externos de las distintas fuentes de energía, para centrales de generación en Alemania, en Centavos de euro por KWeh, en el año 2010 .....	102
Figura 77 – Obra de toma directa típica.....	105
Figura 78 – Configuraciones típicas de tomas indirectas .....	105
Figura 79 – Toma de agua mediante galerías de infiltración .....	106
Figura 80 – Esquema de descarga superficial.....	108
Figura 81 – Esquema de descarga sumergida .....	108
Figura 82 – GWP del metano, en función del tiempo de horizonte .....	112
Figura 83 – Proyección de emisiones de CO <sub>2</sub> debido a desalinización de agua en Abu Dhabi (Eje Y: toneladas de CO <sub>2</sub> emitidas) .....	113

## 11.2. Índice de Tablas

Tabla 1 – Ranking de países con mayor estrés hídrico hacia el año 2040 .....	17
Tabla 2 – Matriz de ponderación de sitio de ejecución del proyecto – elaboración propia .....	20
Tabla 3 – Incidencia en el PBI de las actividades de la economía desde el 2012 al 2016 - Parte 1 .....	27
Tabla 4 – Incidencia en el PBI de las actividades de la economía desde el 2012 al 2016 - Parte 2 .....	27
Tabla 5 – Recursos naturales y uso .....	29
Tabla 6 – Comparación entre distintas tecnologías de desalinización .....	47
Tabla 7 – Cantidad de reactores en operación al año 2015, por tipo de reactor .....	59
Tabla 8 – SMRs en operación al año 2018 .....	63
Tabla 9 – SMRs en construcción al año 2018 .....	63
Tabla 10 – SMRs en etapa de ingeniería básica .....	64
Tabla 11 – Parámetros principales de la evaluación del CCG .....	95
Tabla 12 – Proyección del precio del gas natural .....	96
Tabla 13 – Costo del combustible consumido anual en función del valor del gas .....	98
Tabla 14 – Costos e ingresos principales del CCG .....	98
Tabla 15 – Parámetros principales de la evaluación del CAREM .....	99
Tabla 16 – Costos e ingresos principales del CAREM .....	100
Tabla 17 – Costo del combustible para el ESCENARIO B .....	100
Tabla 18 – Variación de resultados entre diferentes escenarios .....	101
Tabla 19 – Emisiones de la combustión de combustibles fósiles (libras por mil millones de BTU) .....	111

## 11.3. Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 – Fracción vaporizada del líquido de ingreso - Balance de energía .....	39
Ecuación 2 - Valor actual neto .....	94



## 12 GLOSARIO DE SIGLAS

AGWP: Absolute Global Warming Potential

amb: ambiente

ARN: Autoridad Regulatoria Nuclear

BOP: Balance of Plant

BWR: Boiling Water Reactor

CAPM: Capital Asset Pricing Model

CAREM: Central Argentina de Reactores Modulares

CC: Ciclo Combinado

CCG: Ciclo Combinado de Gas

CEE: Consumo Energético Específico

CFD: Core Frequency Damage

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica

EAU: Emiratos Árabes Unidos

ED: Electrodialisis

EEUU: Estados Unidos

ESC: Estructuras Sistemas y Componentes

FBR: Fast Breeders Reactors

FAO: Food and Agriculture Organization

FARN: Federal Authority for Nuclear Regulation

GCR: Gas Cooled Reactor

GEN: Generación

GOR: Gain Output Ratio

GWI: Global Water Institute

GWP: Global Warming Potential

HTGR: High Temperature Gas Reactor

IAEA: International Atomic Energy Agency

INDAG: International Nuclear Desalination Advisory Group

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

KEPCO: Korea Electric Power Company

KSA: King of Saudi Arabia

kWh: Kilo Watt hora

LMFBR: Liquid Metal Fast Breeder Reactor

LOCA: Loss of Coolant Accident

LRF: Large Release Frequency  
LWGR: Light Water Gas Reactor  
MED: Multiple-effect distillation  
MSF: Multi-stage flash distillation  
MVC: Mechanical Vapor-compression  
MWe: Mega Watt eléctrico  
MWt: Mega Watt térmico  
OMS: Organización Mundial de la Salud  
OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries  
O&M: Operación y Mantenimiento  
PBI: Producto Bruto Interno  
PEA: Pileta Externa Anular  
PGA: Peak Ground Acceleration  
ppm: Partes por millón  
PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor  
PWR: Pressurized Water Reactor  
RO: Reverse Osmosis  
RPR: Recipiente de Presión del Reactor  
SMR: Small Modular Reactor  
STD: Sólidos Totales Disueltos  
STS: Sólidos Totales en Suspensión  
TVC: Thermal Vapor-compression  
TWG-ND: Technical Working Group in Nuclear Desalination  
UN: United Nations  
UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation  
USA: United States of América  
VAN: Valor Actual Neto  
VC: Vapor-compression  
WACC: Weighted Average Cost of Capital  
WEF: World Economics Forum  
WRI: World Resource Institute

## **13 ANEXOS**

# *ANEXO A*

## *Selección del país de estudio*

## 1 INTRODUCCIÓN

En el presente ANEXO se desarrolla la metodología empleada para la selección del país óptimo para estudiar la factibilidad del uso del Reactor CAREM para la desalinización de agua. Se partirá por lo tanto de la tabla presentada en el cuerpo principal de la tesis, donde se presentaba el ranking de los 33 países que presentarán mayor estrés hídrico hacia el año 2040. Sobre dicho listado se hará una primera selección del grupo de países a analizar descartando aquellos donde ya se sepa que sea inviable el proyecto. Posteriormente se seleccionarán los criterios de evaluación y la ponderación de los mismos, con los que se armará una matriz de selección. Finalmente, se evaluará a cada uno de los países en las categorías planteadas, obteniendo como resultado el lugar donde se continuará el desarrollo de la tesis.

## 2 DESARROLLO

### 2.1. Descarte inicial de países.

#### 2.1.1. Países sin salida al mar.

Serán que descartados en primera instancia aquellos países que por su geografía no cuenten con salida al mar siendo, por lo tanto, imposible la instalación de una planta de desalinización. Los mismos son:

Rank	Name
1	San Marino
12	Kirguistan
14	Jordania
17	Macedonia
22	Armenia
29	Uzbekistan

**Tabla 1 – Países sin salida al mar**

#### 2.1.2. Países declarados como no nucleares

Si bien no se considera como limitante la existencia de reactores nucleares en la elección del país, si lo es el hecho de alguno se haya declarado abiertamente como un país no nuclear, pues en dicho caso, sería imposible la instalación de un reactor, al menos con la normativa vigente. De esta forma, los países descartados son:

- Kuwait: Luego del accidente de Fukushima, en el año 2011, se emitió un decreto cancelando todos los planes de estudio de instalación de un reactor nuclear.<sup>1</sup>
- Chile: En el año 2015 se ha publicado un documento donde se define la política energética del país hasta el año 2050, donde se establece que la energía nuclear no es una opción por el momento.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Kuwait/Kuwait.htm>

- Grecia: A pesar de contar con una comisión de energía atómica y un reactor experimental, se ha decidido no seguir con el plan nuclear debido al riesgo sísmico del país.<sup>3</sup>

### 2.1.3. *Palestina*

Debido a que no se trata oficialmente de un país, a que no hay acceso a gran parte de la información necesaria para el desarrollo de la tesis, sumado a la situación política que atraviesa, se ha decidido no incluirlo en el presente análisis.

## **2.2. Categorías de evaluación.**

### 2.2.1. *Estrés Hídrico*

En base a la proyección de estrés hídrico realizado por la World Resource Institute, y presentado en la Tabla 1, se evalúa el ratio entre las extracciones de agua y el aporte de renovación de agua a la cuenca. Este factor se pondera con un 25%, pues a mayor problema de falta de agua, mayor necesidad de instalar nuevas plantas de desalinización.

De esta forma, se establecen las siguientes categorías:

- Con un ratio de 4 a 4,19 se evalúa con 2.
- Con un ratio de 4,2 a 4,39 se evalúa con 4.
- Con un ratio de 4,4 a 4,59 se evalúa con 6.
- Con un ratio de 4,6 a 4,79 se evalúa con 8.
- Con un ratio de 4,8 a 5,00 se evalúa con 10.

Se aclara que a mayor ratio se trata de condiciones hídricas más desfavorables, y por lo tanto más propicias para la instalación de un proyecto de desalinización de agua.

### 2.2.2. *Riesgo Sísmico*

Si bien no imposibilita su emplazamiento, el riesgo sísmico afecta directamente el diseño de cualquier reactor nuclear pues Esto se debe a que, a mayor aceleración sísmica, mayores son los esfuerzos para los que deben estar diseñados las estructuras, sistemas y componentes del reactor, y por lo tanto, resultan más costosos. Por lo tanto, este factor se pondera con una incidencia de 20%.

Para poder evaluar el riesgo que presenta cada uno de los países evaluados, se utiliza el mapa de riesgo sísmico, que se muestra en el ANEXO B. En el mismo se indica una escala de colores basados en la aceleración de campo libre, con una recurrencia de 475 años, con una probabilidad de ser superada del 10% en 50 años.

---

<sup>2</sup> <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Chile/Chile.htm>

<sup>3</sup> <https://www.oecd-nea.org/law/legislation/greece.pdf>

En países grandes con zonas de diferente riesgo sísmico ha adoptado aquella correspondiente a la zona costera. En aquellos países que de todas formas presentan distintas categorías en zonas costeras, se ha adoptado la correspondiente al sector donde se encuentra la capital o ciudad más importante.

De esta forma, se establecen las siguientes categorías:

- Riesgo MUY ALTO (color rojo intenso y marrón) se evalúa con 2.
- Riesgo ALTO (color rosa y rojo claro) se evalúa con 4.
- Riesgo MODERADO (color amarillo) se evalúa con 6.
- Riesgo BAJO (color verde) se evalúa con 8.
- Riesgo NULO (color blanco) se evalúa con 10.

### 2.2.3. *Actividad Nuclear*

La existencia de actividad nuclear en el país se evalúa debido a que la existencia de la misma garantiza el marco institucional y legal propicio para la instalación de un nuevo reactor nuclear. Se debe destacar que no contar con dicha estructura no imposibilita la instalación de una central nueva, aunque demora los tiempos y trámites para poder realizarlo. Por lo tanto, se pondera esta categoría con un 25%.

De esta forma, se establecen las siguientes categorías:

- Si no hay reactores nucleares en operación o construcción, pero no se descartan se evalúa con 4.
- Si no hay reactores en desmantelamiento, o en parada de largo término se evalúa con 6.
- Si no hay reactores en operación, pero si en construcción, se evalúa con 8.
- Hay reactores en operación se evalúa con un 10.

### 2.2.4. *PBI del país*

Tanto la desalinización de agua de mar como la industria nuclear son de capital intensivo, por tal motivo se evalúa el producto bruto interno de cada uno de los países, como una medida de la capacidad económica de los mismos para afrontar este tipo de obras, Si bien es cierto que para proyectos de esta índole suele haber financiamiento de distintos organismos internacionales, de todas formas ha decidido considerarlo en la evaluación aunque con una incidencia del 15%.

Para poder determinar el puntaje aplicable a cada país se ha considerado el PBI más elevada y el menor, dividiendo el rango de valores abarcados por los mismos en 10 sub-rangos. De esta forma, se establecen las siguientes categorías en función del valor en miles de millones de USD:

- Si el valor es entre 13.43 y 135.23 se evalúa con 1.
- Si el valor es entre 135.23 y 257.03 se evalúa con 2.



- Si el valor es entre 257.07 y 378.83 se evalúa con 3.
- Si el valor es entre 378.83 y 500.63 se evalúa con 4.
- Si el valor es entre 500.63 y 622.43 se evalúa con 5.
- Si el valor es entre 622.43 y 744.23 se evalúa con 6.
- Si el valor es entre 722.43 y 866.03 se evalúa con 7.
- Si el valor es entre 866.03 y 987.83 se evalúa con 8.
- Si el valor es entre 987.83 y 1109.63 se evalúa con 9.
- Si el valor es entre 1109.63 y 1232 se evalúa con 10.

#### 2.2.5. Estabilidad política

La estabilidad política de un país es relevante a la hora de la elección del país óptimo para instalar el proyecto. Esta afirmación encuentra sustento no solo en el hecho de que afecta en la llegada o no de inversiones al país, sino en el hecho de que los reactores nucleares requieren condiciones de seguridad determinadas, que el accionar de grupos terroristas o la falta de un estado afirmado pueden poner en riesgo. Por lo anteriormente expuesto, se ha evaluado este ítem con una incidencia del 15%.

Para evaluar la estabilidad del país se ha utilizado el indicador denominado *Political Stability and Absence of Violence/Terrorism*<sup>4</sup>, provisto por el *World Bank* en el año 2016. El mismo mide la percepción de que un gobierno sea desestabilizado o derrocado por medios inconstitucionales o violentos<sup>5</sup>. Para determinar la puntuación aplicable a cada país, se operó de similar forma que, en el indicador económico, es decir identificando todo el rango cubierto por todos los países en estudio, y dividiéndolo en 10, resultando los siguientes grupos

- Para índices entre -2,91 y -2,47 se evalúa con 1.
- Para índices entre -2,47 y -2,022 se evalúa con 2.
- Para índices entre -2,022 y -1,58 se evalúa con 3.
- Para índices entre -1,58 y -1,13 se evalúa con 4.
- Para índices entre -1,13 y -0,69 se evalúa con 5.
- Para índices entre -0,69 y -0,246 se evalúa con 6.
- Para índices entre -0,246 y 0,198 se evalúa con 7.
- Para índices entre 0,198 y 0,642 se evalúa con 8.
- Para índices entre 0,642 y 1,086 se evalúa con 9.

---

<sup>4</sup> Traducción al español: Estabilidad política y ausencia de violencia / terrorismo"

<sup>5</sup> <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=worldwide-governance-indicators>

- Para índices entre 1,086 y 1,53 se evalúa con 10.

### **2.3. Tabla de ponderación**

En base a lo mencionado anteriormente se ha confeccionado la tabla de ponderación resultando de la siguiente forma:

País	Factor evaluado																			TOTAL	
	ranking de estrés				riesgo sísmico				Actividad Nuclear				Indicador económico				Estabilidad política				
	factor ponderación	indicador	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	indicador	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	indicador	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	indicador	puntaje obtenido	parcial ponderado	factor ponderación	indicador	puntaje obtenido		parcial ponderado
Bahrain	,25	5.00	10	2,5	0,2	BAJO	8	1,6	0,25	no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5	0,15	22.357,89	4,00	0,6	0,15	-0,86	5	0,75	6,95
Qatar		5.00	10	2,5		BAJO	8	1,6		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		59.338,52	10,00	1,5		0,87	9	1,35	8,45
Singapore		5.00	10	2,5		BAJO	8	1,6		sin reactores no descartado	4	1		52.969,50	9,00	1,35		1,53	10	1,5	7,95
Saudi Arabia		4.99	9	2,25		BAJO	8	1,6		reactores en cosntruccion	8	2		20.024,78	4,00	0,6		-0,5	6	0,9	7,35
Libano		4.97	9	2,25		ALTO	4	0,8		sin reactores no descartado	4	1		7.914,10	2,00	0,3		-1,56	4	0,6	4,95
Iran		4.91	9	2,25		MUY ALTO	2	0,4		reactores en operación	10	2,5		4.900,35	1,00	0,15		-0,74	5	0,75	6,05
Iraq		4.66	6	1,5		MODERADO	6	1,2		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		4.610,22	1,00	0,15		-2,28	2	0,3	4,65
Pakistan		4.48	4	1		ALTO	4	0,8		reactores en operación	10	2,5		1.468,43	1,00	0,15		-0,74	5	0,75	5,2
Syria		4.44	4	1		ALTO	4	0,8		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		2.192,62	1,00	0,15		-2,91	1	0,15	3,6
Turkey		4.27	2	0,5		MUY ALTO	2	0,4		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		10.787,32	2,00	0,3		-2	3	0,45	3,15
United Arab Emirates		5.00	10	2,5		MODERADO	6	1,2		reactores en cosntruccion	8	2		37.615,97	7,00	1,05		0,44	8	1,2	7,95
Israel		5.00	5	1,25		ALTO	4	0,8		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		37.287,94	7,00	1,05		-0,83	5	0,75	5,35
Oman		4.97	9	2,25		MODERADO	6	1,2		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		14.980,79	3,00	0,45		0,8	9	1,35	6,75
Yemen		4.74	7	1,75		BAJO	8	1,6		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		990,43	1,00	0,15		-2,79	1	0,15	5,15
Azerbaijan		4.69	6	1,5		MUY ALTO	2	0,4		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		3.877,28	1,00	0,15		-0,87	5	0,75	4,3
Kazakhstan		4.66	6	1,5		BAJO	8	1,6		no tiene reactores pero esta en planes	6	1,5		7.511,24	2,00	0,3		0,04	7	1,05	5,95
Turkmenistan		4.30	3	0,75		ALTO	4	0,8		sin reactores no descartado	4	1		6.388,84	2,00	0,3		-0,34	6	0,9	3,75
Spain		4.07	1	0,25		MODERADO	6	1,2		reactores en operación	10	2,5		26.460,48	5,00	0,75		0,49	8	1,2	5,9

Tabla 2 – Matriz de ponderación de países

### 3 CONCLUSIONES

AL ordenar los resultados de la Tabla 3 se obtiene el siguiente orden de prioridad para seleccionar el país de estudio de la tesis.

Posición	Pais	TOTAL
1	Emiratos Árabes Unidos	7,35
2	Singapur	7,05
3	Qatar	6,75
4	Arabia Saudita	6,65
5	España	6,65
6	Iran	6,5
7	Bahrein	6
8	Kazakhstan	5,8
9	Pakistan	5,5
10	Marruecos	5,25
11	Libia	5,05
12	Líbano	4,8
13	Yemen	4,65
15	Iraq	4,3
16	Israel	4,25
17	Túnez	4
18	Palestina	3,95
19	Azerbaijan	3,8
20	Argelia	3,75
21	Turkmenistan	3,6
22	Turquía	3,4
23	Siria	3,1

**Tabla 3 – Orden de prioridad de selección de país para proyecto de desalinización**

**4**

# *ANEXO B*

## *Mapa de riesgo sísmico*



# *ANEXO C*

## *Flujo de fondos CCG*



Tasa de interes	6,00%											
PERIODO	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
INVERISON	127.040.000	127.040.000	127.040.000									
COSTO DE OPERACIÓN	-	-	-	88.260.163	90.896.873	93.625.868	96.450.378	99.373.745	102.399.430	105.531.015	108.772.204	112.126.836
INGRESOS	-	-	-	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172
Neto	- 127.040.000	- 127.040.000	- 127.040.000	166.944.009	164.307.299	161.578.304	158.753.794	155.830.427	152.804.742	149.673.157	146.431.968	143.077.336

PERIODO	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
INVERISON												
COSTO DE OPERACIÓN	113.118.848	114.120.781	115.132.733	116.154.804	117.187.096	118.229.711	119.282.752	120.346.324	121.420.531	122.505.481	123.601.279	124.708.036
INGRESOS	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172
Neto	142.085.324	141.083.391	140.071.439	139.049.368	138.017.076	136.974.461	135.921.420	134.857.848	133.783.641	132.698.691	131.602.892	130.496.136

PERIODO	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
INVERISON						190.560.000						
COSTO DE OPERACIÓN	125.825.861	126.954.863	128.095.156	129.246.852	130.410.064		132.771.502	133.969.961	135.180.405	136.402.953	137.637.727	138.884.848
INGRESOS	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	-	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172
Neto	129.378.311	128.249.309	127.109.016	125.957.320	124.794.108	- 190.560.000	122.432.670	121.234.211	120.023.767	118.801.219	117.566.445	116.319.324

PERIODO	36	37	38	39	40	41	42	43	44
INVERISON									
COSTO DE OPERACIÓN	140.144.440	141.416.629	142.701.539	143.999.299	145.310.036	146.633.880	147.970.963	149.321.417	150.685.375
INGRESOS	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	255.204.172	293.316.172
Neto	115.059.731	113.787.543	112.502.633	111.204.873	109.894.136	108.570.292	107.233.209	105.882.755	142.630.797

VAN	1.422.723.161
-----	---------------

# *ANEXO D*

## *Flujo de fondos – energía nuclear*

Tasa de interes 6,00%

PERIODO	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
INVERSION	158.400.000	158.400.000	158.400.000	158.400.000	158.400.000							
COSTO DE OPERACIÓN						62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712
INGRESOS						249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185
NETO	- 158.400.000	- 158.400.000	- 158.400.000	- 158.400.000	- 158.400.000	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473
NETO ACTUALIZADO	- 158.400.000	- 149.433.962	- 140.975.436	- 132.995.694	- 125.467.636	139.629.279	131.725.735	124.269.561	117.235.435	110.599.467	104.339.120	98.433.132

PERIODO	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
INVERSION												
COSTO DE OPERACIÓN	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712
INGRESOS	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185
NETO	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473
NETO ACTUALIZADO	92.861.445	87.605.137	82.646.356	77.968.260	73.554.962	69.391.474	65.463.655	61.758.165	58.262.420	54.964.547	51.853.346	48.918.251

PERIODO	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
INVERSION												
COSTO DE OPERACIÓN	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712
INGRESOS	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185
NETO	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473
NETO ACTUALIZADO	46.149.293	43.537.069	41.072.707	38.747.837	36.554.563	34.485.437	32.533.431	30.691.916	28.954.638	27.315.696	25.769.524	24.310.872

PERIODO	36	37	38	39	40	41	42	43	44
INVERSION									
COSTO DE OPERACIÓN	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	62.819.712	348.162.780
INGRESOS	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185	249.675.185
NETO	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	186.855.473	- 98.487.596
NETO ACTUALIZADO	22.934.785	21.636.590	20.411.877	19.256.488	18.166.498	17.138.205	16.168.118	15.252.942	- 7.584.439

\$ 1.085.158.949,58 VAN

# *ANEXO E*

## *Costo de gas en ESCENARIO B*

ANEXO E - COSTO COMBUSTIBLE ESCENARIO B

Año	período	Precio del gas (\$/mmBTU)	Costo anual de combustible
2.019,00	-	2,70	0*
2.020,00	1,00	3,38	0*
2.021,00	2,00	3,49	0*
2.022,00	3,00	3,74	94.168.212,09
2.023,00	4,00	3,87	97.464.099,51
2.024,00	5,00	4,01	100.875.343,00
2.025,00	6,00	4,15	104.405.980,00
2.026,00	7,00	4,29	108.060.189,30
2.027,00	8,00	4,44	111.842.295,93
2.028,00	9,00	4,60	115.756.776,28
2.029,00	10,00	4,76	119.808.263,45
2.030,00	11,00	4,93	124.001.552,67
2.031,00	12,00	4,98	125.241.568,20
2.032,00	13,00	5,03	126.493.983,88
2.033,00	14,00	5,08	127.758.923,72
2.034,00	15,00	5,13	129.036.512,96
2.035,00	16,00	5,18	130.326.878,09
2.036,00	17,00	5,23	131.630.146,87
2.037,00	18,00	5,28	132.946.448,34
2.038,00	19,00	5,34	134.275.912,82
2.039,00	20,00	5,39	135.618.671,95
2.040,00	21,00	5,44	136.974.858,67
2.041,00	22,00	5,50	138.344.607,26
2.042,00	23,00	5,55	139.728.053,33
2.043,00	24,00	5,61	141.125.333,86
2.044,00	25,00	5,66	142.536.587,20
2.045,00	26,00	5,72	143.961.953,07
2.046,00	27,00	5,78	145.401.572,60
2.047,00	28,00	5,84	146.855.588,33
2.048,00	29,00	5,89	148.324.144,21
2.049,00	30,00	5,95	149.807.385,65
2.050,00	31,00	6,01	151.305.459,51
2.051,00	32,00	6,07	152.818.514,11
2.052,00	33,00	6,13	154.346.699,25
2.053,00	34,00	6,19	155.890.166,24
2.054,00	35,00	6,26	157.449.067,90
2.055,00	36,00	6,32	159.023.558,58
2.056,00	37,00	6,38	160.613.794,17
2.057,00	38,00	6,45	162.219.932,11
2.058,00	39,00	6,51	163.842.131,43
2.059,00	40,00	6,58	165.480.552,74
2.060,00	41,00	6,64	167.135.358,27
2.061,00	42,00	6,71	168.806.711,85
2.062,00	43,00	6,77	170.494.778,97
2.063,00	44,00	6,84	172.199.726,76