



Máster Ingeniería Industrial

Desalación de agua de mar por ósmosis inversa en Nueva Caledonia

Introducción a la tecnología, características y costes, prediseño de una planta desalinizadora aplicado al caso de Nueva Caledonia

07/03/2016

Autor: Arthur Nagle
Ecole Centrale Nantes & Universidad de Sevilla
Tutora: Lourdes García Rodríguez
Departamento de Ingeniería Energética

|Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincera gratitud a mi tutora, la Profesora Lourdes García Rodríguez, por su apoyo, comprensión y por la autonomía que me otorgó.

También quiero agradecer a mis compañeros de clase, especialmente Alicia Sánchez-Laulhé Cazorla, por motivarme y ayudarme, principalmente con el uso de la lengua española.

Por último, no me quiero olvidar de mi familia, que siempre me ha apoyado en mis decisiones.

|Resumen

La desalación del agua del mar es una solución prometedora para producir agua para el consumo humano. En zonas costeras, resulta muy interesante usar el recurso eólico para suministrar la energía requerida por la planta desalinizadora.

El estudio desarrollado a continuación trata de diseñar una planta de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, adaptada a las especificidades de Nueva Caledonia. Incluye la recopilación de datos sobre las propiedades del agua del mar y las características del viento, usados como entrada en los procesos de cálculo. Con el programa ROSA, se realiza un análisis comparativo entre un diseño estándar y un diseño híbrido inter-etapa, usando varios tipos de membrana de última generación. Se trata de obtener un diseño que proporcione menor consumo energético específico y mejor distribución de densidad de flujo de permeado. Posteriormente, se calcula la producción eólica con el fin de dimensionar un parque eólico que pueda alimentar la planta desalinizadora. Además, el estudio incluye el cálculo del coste capital, del coste de operación y mantenimiento, y del coste del agua comercializada. Por último, se realiza una simulación para evaluar la energía suministrada por el aerogenerador y la producción de agua durante el año 2015.

Tabla de contenido

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Lista de ilustraciones	V
Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VIII
Nomenclatura	XI
1. Contexto de Nueva Caledonia e introducción a la ósmosis inversa	1
1.1. <i>Datos generales y especificidades</i>	1
1.1.1. Demografía	1
1.1.2. Industria	3
1.2. <i>Características hidrográficas</i>	6
1.2.1. Escala global.....	6
1.2.2. La Grande Terre.....	7
1.2.3. Las Islas de la Lealtad	7
1.3. <i>Enfoque sobre Nouméa y sus alrededores</i>	8
1.3.1. Hidrografía.....	8
1.3.2. Doniambo – SLN	8
1.3.3. Consumo de agua	9
1.4. <i>Introducción a la desalación por ósmosis inversa</i>	10
1.4.1. Descripción física del fenómeno	10
1.4.2. Etapas del proceso.....	11
1.4.3. Consumo energético	12
1.4.4. Coste del agua comercializada	13
2. Características y costes de una planta de desalación por ósmosis inversa	15
2.1. <i>Descripción del núcleo productivo</i>	15
2.1.1. Elementos constructivos.....	15
2.1.2. Configuraciones	18
2.1.3. Eliminación de boro: efectos sobre el diseño.....	19
2.2. <i>Estimación de costes de una planta de desalación</i>	22
2.2.1. Introducción.....	22
2.2.2. Entradas del proceso de estimación.....	22
2.2.3. Salidas: coste capital, coste de operación y coste del agua	24

2.2.4. Tabla de cálculo de costes con Excel a partir de los parámetros claves..	27
3. Prediseño del núcleo productivo y cálculo del consumo energético	29
3.1. Datos de entrada: características del agua de mar.....	29
3.2. Criterios de diseño y metodología	31
3.2.1. Hipótesis de partida	31
3.2.2. Cálculo del número de tanques de presión necesarios	32
3.2.3. Criterios de elección del diseño.....	32
3.3. Comparación de diseños.....	33
3.3.1. Configuración estándar.....	33
3.3.2. Configuración híbrida inter-etapa.....	34
3.3.3. Análisis diseño híbrido: conversión y productividad constantes	36
3.3.4. Análisis diseño híbrido: caudal y presión de alimentación constantes ...	40
3.4. Sistema de recuperación de energía	42
3.4.1. Cálculo del ahorro energético	42
3.4.2. Conversión y producción constantes	43
3.4.3. Caudal y presión de alimentación constantes	44
3.5. Conclusiones	46
4. Prediseño de una planta de desalación por ósmosis inversa	47
4.1. Núcleo productivo	47
4.1.1. Poé-Bourail.....	47
4.1.2. Nouméa	48
4.1.3. Requisitos energéticos	49
4.2. Sistema de producción de energía eólica.....	49
4.2.1. Selección de aerogeneradores	50
4.2.2. Distribución de probabilidad	50
4.2.3. Cálculo de la potencia media anual generada por el aerogenerador	53
4.3. Costes.....	55
4.3.1. Coste del recurso	55
4.3.2. Coste capital	57
4.3.3. Coste de operación y mantenimiento.....	61
4.3.4. Coste del agua.....	62
4.4. Simulación.....	63
4.4.1. Hipótesis de cálculo y procedimiento	63
4.4.2. Resultados de las simulaciones	64

5. Resultados y discusión	67
5.1. <i>Definición del alcance</i>	67
5.1.1. Objetivo.....	67
5.1.2. Herramientas y recursos.....	67
5.2. <i>Secuencia de las actividades y discusión</i>	68
5.2.1. Definir el contexto e introducir a la desalación por ósmosis inversa.....	68
5.2.2. Diseñar un núcleo productivo adecuado	68
5.2.3. Dimensionar el sistema de producción de energía eólica.....	69
5.2.4. Estimar los costes	69
5.2.5. Simular	69
6. Conclusión	71
Referencias	73

Lista de ilustraciones

Ilustración 1.1: Reparto de los núcleos de población	2
Ilustración 1.2: Minas y plantas de explotación y transformación de níquel.....	3
Ilustración 1.3: Medios de producción de energía eléctrica	5
Ilustración 1.4: Topografía de Nueva Caledonia.....	6
Ilustración 2.1: Movimientos de los distintos flujos en un elemento espiral	16
Ilustración 2.2: Interconexión de elementos	16
Ilustración 3.1: Composición ajustada del agua de entrada en el programa ROSA .	31

Lista de figuras

Figure 1.1: Evolución del consumo por tipos de cliente entre 2005 y 2012	9
Figure 1.2: Representación esquemática de la ósmosis inversa	11
Figure 1.3: Esquema de los componentes principales de una planta de desalación por ósmosis inversa	12
Figure 2.1: Proceso de OI con sistema de recuperación basado en intercambiador de presión	17
Figure 2.2: Proceso de OI con sistema de recuperación basado en turbocharger ...	17
Figure 2.3: Configuración dos pasos	18
Figure 2.4: Configuración dos pasos parcial	18
Figure 2.5: Configuración dos pasos con split-partial	19
Figure 2.6: Configuración dos etapas.....	19
Figure 2.7: Nivel de emisión de boro en función de la tecnología usada	21
Figure 2.8: Diagrama de flujo de la planta de Eilat, Israel.....	22
Figure 3.1: Evolución de la temperatura del agua de mar en Poé, Bourail	30
Figure 3.2: Evolución del consumo energético específico en función del número de elementos.....	34
Figure 3.3: Distribución del flujo de permeado en distintos diseños basados en membranas de Filmtec	37
Figure 3.4: Distribución del flujo de permeado en distintos diseños híbridos.....	38
Figure 3.5: Consumo energético específico en los distintos diseños.....	39
Figure 3.6: Calidad del agua producida en los distintos diseños.....	39
Figure 3.7: Distribución de flujo de permeado a lo largo de un tubo de presión en distintos diseños	41
Figure 3.8: Flujo de producto con distintos diseños	41
Figure 3.9: Conversión con distintos diseños	42
Figure 3.10: Configuración con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión.....	43
Figure 3.12: Consumo energético específico sin y con recuperación de energía en cada uno de los diseños. Conversión y productividad constantes.....	44
Figure 3.12: Consumo energético específico sin y con recuperación de energía en cada uno de los diseños. Caudal y presión de alimentación constantes.....	45
Figure 4.1: Función de distribución de probabilidad para las estaciones de Poé y Nouméa frente la curva de potencia del aerogenerador	53
Figure 4.2: Representación de la potencia incremental discreta	54

Figure 4.3: Coste del kWh en función del régimen de viento y del coste capital	56
Figure 4.4: Producción del aerogenerador para el mes de junio 2015, Nouméa.....	64
Figure 4.5: Balance de energía . Periodo 5-6-7 de junio 2015	65
Figure 4.6: Balance de energía . Periodo 17-18-19 de junio 2015.....	65
Figure 4.7: Producción eólica anual y agua obtenida	66

Lista de tablas

Tabla 1.1: Población por provincia	2
Tabla 1.2: Medios de producción térmicos	5
Tabla 1.3: Recursos en agua de la ciudad de Nouméa	8
Tabla 1.4: Consumo de agua 2012 en Nouméa	9
Tabla 1.5: Capacidad instalada en el mundo por tecnología.....	10
Tabla 1.6: Inversión específica en función de la capacidad de la planta	12
Tabla 1.7: Coste del agua comercializada por varias plantas	13
Tabla 2.1: Regulación sobre el contenido límite en boro del agua potable.....	20
Tabla 2.2: Características de la toma de agua.....	23
Tabla 2.3: Especificaciones respecto a la calidad del producto	23
Tabla 2.4: Desglose del coste capital	25
Tabla 2.5: Desglose del coste de operación y mantenimiento.....	26
Tabla 2.6: Desglose del coste del agua.....	26
Tabla 2.7: Tabla Excel de cálculo de costes a partir de los parámetros claves	28
Tabla 3.1: Composición del agua de mar del océano pacífico.....	30
Tabla 3.2: Características de los distintos diseños de configuración simple.....	33
Tabla 3.3: Consumo energético, calidad del producto y concentración de boro para cada uno de los diseños convencionales.....	33
Tabla 3.4: Características de las tres membranas de Filmtec comparadas.....	36
Tabla 3.5: Contenido de boro en el permeado para los distintos diseños	40
Tabla 3.6: Coeficiente de dilatación cúbica en función de la temperatura	43
Tabla 3.7: Ahorro energético para cada uno de los diseños. Conversión y productividad constantes	44
Tabla 3.8: Ahorro energético para cada uno de los diseños. Caudal y presión de alimentación constantes	45
Tabla 4.1: Características de la planta POE-BRL para una temperatura del agua de mar de 25.45°C	47
Tabla 4.2: Consumo específico para varios diseños.....	48
Tabla 4.3: Consumo específico con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión. Conversión y productividad constantes	49
Tabla 4.4: Consumo específico con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión. Caudal y presión de alimentación constantes	49
Tabla 4.5: Requisitos energéticos para las plantas de Poé-BRL y Nouméa.....	49

Tabla 4.6: Características del equipo seleccionado: GEV MP C - 275 kW	50
Tabla 4.7: Valores de k y c para 16 estaciones meteorológicas en Canarias	51
Tabla 4.8: Velocidad media del viento y velocidad elevada al cubo media para las estaciones de Poé-BRL y AnseVata-NOU	52
Tabla 4.9: Parámetros k y c a la altura de referencia de 10 m y a la altura del buje de 55 m para las estaciones de Poé-BRL y Nouméa	53
Tabla 4.10: Potencia generada, potencia requerida y número de aerogeneradores necesarios para Nouméa y Poé.....	54
Tabla 4.11: Potencia instalada, energía producida anualmente y horas equivalentes para Nouméa y Poé	55
Tabla 4.12: Estructura desglosada del coste capital de un aerogenerador.....	56
Tabla 4.13: Estructura de los costes para Poé y Nouméa	57
Tabla 4.14: Costes de construcción de los elementos claves del sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa	58
Tabla 4.15: Estructura desglosada del coste capital directo.....	58
Tabla 4.16: Estructura desglosada de los costes de ingeniería de proyectos	59
Tabla 4.17: Estructura desglosada de los costes de gestión de proyectos	59
Tabla 4.18: Estructura desglosada de los costes de financiación del proyecto	60
Tabla 4.19: Estructura desglosada del coste capital total.....	60
Tabla 4.20: Estructura del coste de O&M	61
Tabla 4.21: Estructura del coste del agua.....	61
Tabla 4.22: Resumen de los requisitos energéticos de la planta en el punto de funcionamiento nominal.....	63
Tabla 4.23: Resultados de la simulación anual (2015)	66

Nomenclatura

Acrónimos

TOI	Tren de Ósmosis Inversa
OIAM	Ósmosis Inversa para Agua de Mar
OIAS	Ósmosis Inversa para Agua Salobre
IP	Intercambiador de Presión
TC	Turbo Charger
BAP	Bomba de Alta Presión
BB	Bomba Booster
TDS	Total Dissolved Solids
pdf	Probability Distribution Function

Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>
Q_{BD}	Caudal del concentrado (BlowDown)	m^3/s
P_{BD}	Presión del concentrado	Pa
C_{esp}	Consumo energético específico	kWh/m^3
P_{req}	Potencia requerida por la planta de desalación	kW
E_{req}	Energía anual requerida por la planta	MWh/año
v_{on}	Velocidad de arranque del aerogenerador	m/s
v_{off}	Velocidad de parada del aerogenerador	m/s
k	Factor de forma adimensional	-
c	Parámetro de escala	m/s
$\overline{v_w}$	Velocidad media del viento	m/s
α	Coefficiente de corrección de altura	-
$\overline{P_{WT}}$	Potencia media anual generada por el aerogenerador	kW

1

Contexto de Nueva Caledonia e introducción a la ósmosis inversa para agua de mar

El primer capítulo proporciona una breve visión de los aspectos generales de Nueva Caledonia, con respecto al agua. Incluye tanto datos de demografía, como de topología, hidrografía, industria y consumos de agua. Además, una introducción a la tecnología de desalación por ósmosis inversa permite establecer las bases de dicho proceso.

1.1. Datos generales y especificidades

1.1.1. Demografía

Nueva Caledonia es un archipiélago de una superficie de 18575 km², compuesto por una isla principal, denominada La Grande Terre, y varias islas de tamaño menor que se reparten alrededor (Isla de los Pinos, Islas de la Lealtad, Islas Belep). Divido en 3 provincias (Islas, Norte, Sur), el conjunto cuenta con 268 767 habitantes [1], con una baja densidad de población de 14 hab/km². Los pueblos o núcleos de población en la Grande Terre se reparten alrededor de la cadena de montaña central, así que son la mayoría costeros o se encuentran muy cerca del mar, como se aprecia en la ilustración 1.1. Dicha distribución presenta una gran ventaja a la hora de implementar la tecnología de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, reduciendo las distancias de bombeo del agua de alimentación desde la toma de agua y la del agua producto hacia el consumo.

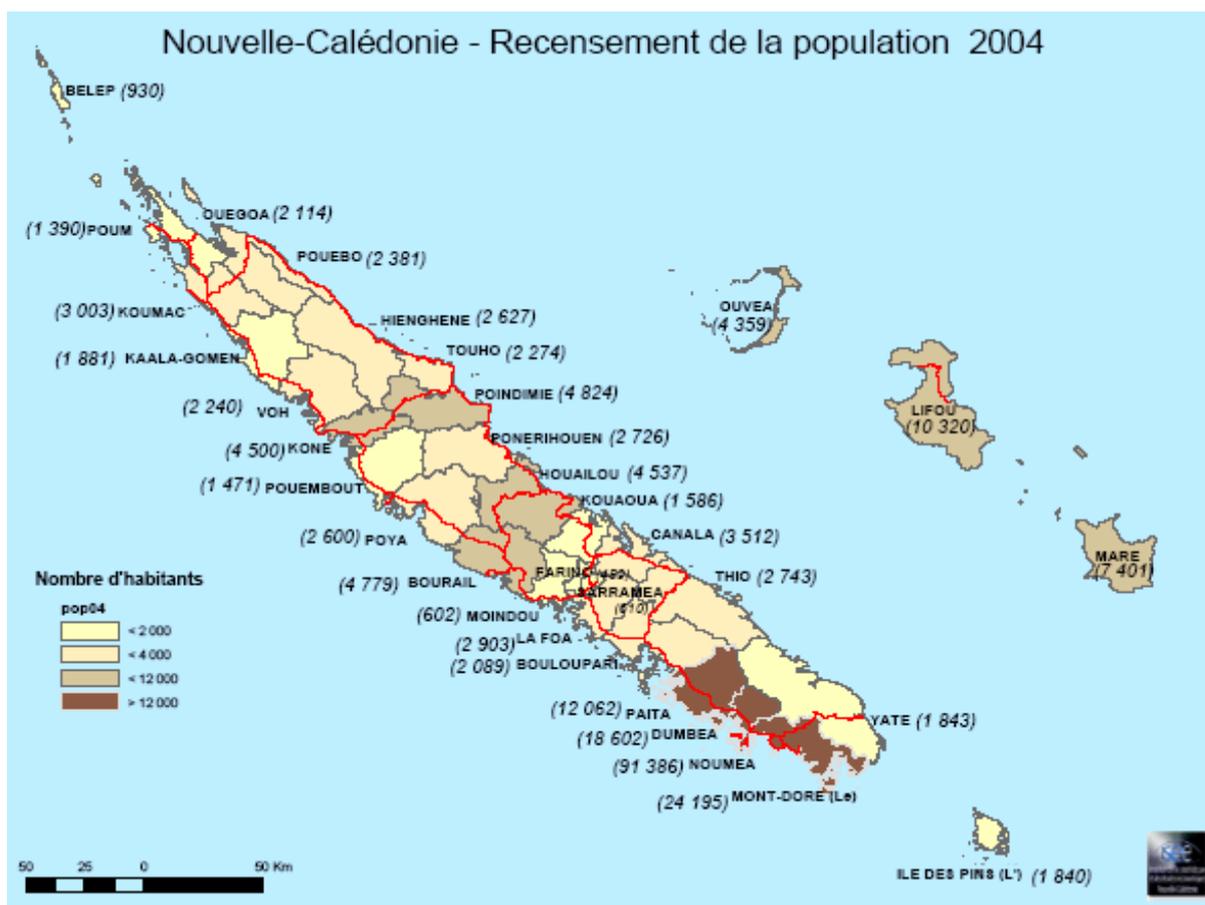


Ilustración 1.1: Reparto de los núcleos de población [2]

Se nota una desigualdad de reparto de la población en el territorio: la provincia Sur concentra más del 70% de la población total, como se puede apreciar en la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Población por provincia [1]

Provincia	Islas	Norte	Sur	Total
Población (hab)	18 297	50 487	199 983	268 767
Porcentaje (%)	6.81	18.78	74.41	100
Densidad (hab/km ²)	9.2	5.27	27.4	14

Además, existe también una desigualdad dentro de la provincia sur, encontrándose el 40% de la población total del territorio en la capital Nouméa (2135 hab/km²), y el 67% en Nouméa y sus alrededores, denominándose Grand Nouméa (99 hab/km²). El desequilibrio en el reparto de la población es el resultado de la concentración de las actividades económicas en la capital. En efecto, históricamente, la primera planta metalúrgica de transformación de níquel se construyó en Nouméa, y sigue actualmente en operación. Además el puerto de la capital es el punto de entrada y salida de las mercancías, desarrollándose muchos servicios alrededor. Sin embargo, la evolución industrial en los

denominada La Coco. Esas exacciones son reglamentadas. En fase operacional, el sitio será completamente independiente ya que el agua potable procederá de la unidad de desalación. Se está construyendo una tubería en el mar que suministrará agua de mar a 3000 m³/hora [5]. Una parte se utilizará tal cual (salada) para los circuitos de refrigeración (2500 m³/hora) de dicha planta metalúrgica y para la central eléctrica (que suministra energía a los hornos eléctricos de la planta), la otra parte va dirigida hacia la unidad de desalación para las necesidades en agua potable (129 m³/hora) y desmineralizada como agua de proceso para las calderas y circuitos de refrigeración (53 m³/hora [6]).

En la planta de Doniambo, también se emplea agua de refrigeración (ya que los procesos son similares), pero al estar situada en Nouméa, se supone que el consumo de agua potable será menor, debido a que los empleados viven cerca de la planta por lo cual no hace falta la construcción de viviendas in situ. El consumo en agua bruta de dicha planta aparece en la tabla 1.4.

La planta de Goro es distinta de las dos precedentes. Es la única que emplea el proceso hidrometalúrgico, lo cual permite la explotación de minerales de menor concentración en níquel. Esta tecnología está basada en la utilización de agua. El proceso hidrometalúrgico desarrollado por Goro-VALE NC requiere agua dulce. La zona se beneficia de condiciones meteorológicas favorables, ya que la lluvia supera la evaporación. VALE se alimenta del agua del lago de Yaté, donde se ubica una presa explotada por ENERCAL para la producción de energía, vía una tubería con circulación forzada y una central hidroeléctrica. La meta que se asignó VALE es una tasa de reciclaje de agua dulce del 75 % [7]. Esta planta emplea también ácido sulfúrico, de forma que un post tratamiento de los efluentes es imprescindible. Además, la parte sur de la laguna caledoniana está registrada en el patrimonio mundial del UNESCO, por lo cual un seguimiento estricto es necesario.

Energía. La producción de energía, tanto para los particulares como para la industria metalúrgica, también es un consumidor de agua. Enercal es la empresa que se encarga de 98% de la producción de electricidad, transporte y distribución. Los medios de producción están presentados en la ilustración 1.3. Se puede distinguir dos tipos de medio de producción mayores:

- Térmico: centrales térmicas de Népoui, Ducos, Prony, Doniambo, y centrales autónomas.
- Hidráulico: centrales hidroeléctricas de Yaté, Néaoua, Thû, y micro centrales hidráulicas.



Ilustración 1.3: Medios de producción de energía eléctrica en Nueva Caledonia [8]

Dentro de los medios térmicos podemos identificar las distintas tecnologías empleadas, presentados en la tabla 1.2.

Tabla 1.2: Medios de producción térmicos

Central	Népoui	Ducos	Prony	Doniambo
Tipo	Motores Diésel	Turbinas de Gas	Turbinas de vapor	Turbinas de vapor
Potencia	55 MW	43 MW	2X50 MW	4X40 MW
Combustible	Fuel-oil	Keroseno	Carbón	Fuel-oil

Los procesos que emplean turbinas de vapor involucran agua en el circuito principal (que alimenta la caldera para llegar a condiciones a la entrada de la turbina) pero también en el circuito de refrigeración, es decir en el condensador. En el caso de Prony, se emplea agua del río para condensar el vapor del circuito principal, mientras que en el caso de Doniambo se emplea agua del mar.

Podemos notar también la necesidad de agua en los otros procesos, por ejemplo el motor diésel de Népoui cuenta con tres circuitos de agua: el de aguas aceitosas, de agua de refrigeración, y de agua sobrecalentada (para utilización).

Además de los medios de producción principales presentados, existen también soluciones alternativas renovables. Entre otros, cabe mencionar los parques eólicos explotados por

Vergnet Pacific y los kits fotovoltaicos individuales para sitios aislados desarrollados por Enercal.

Agricultura. La actividad agrícola, cría de bovinos mayormente, se encuentra sobretodo en la costa oeste, donde el relieve consiste en explanadas. Es también la zona con pluviometría menor [9], enfrentándose, de hecho, a problemas de sequía.

Además se deben considerar los impactos de la agricultura sobre la calidad del agua (al usar pesticidas), incluyendo planes de protección de las cuencas estratégicas.

1.2. Características hidrográficas

1.2.1. Escala global

Como se ha mencionado anteriormente, la isla principal tiene una cadena montañosa a lo largo del eje de la isla (ver ilustración 1.4). Esa cadena separa la isla entre la costa oeste, caracterizada por explanadas, y la costa este, más abrupta con montañas y cascadas directamente frente al mar. Esta cadena organiza la red hidrográfica de La Grande Terre, la única desarrollada en el archipiélago. De hecho, se pueden destacar los ríos de la Tontouta, la Dumbea, la Foa o la Néra en la costa oeste, y los valles de la Ouaieme, la Tchamba, la Amoa y la Tiwaka en la costa este.

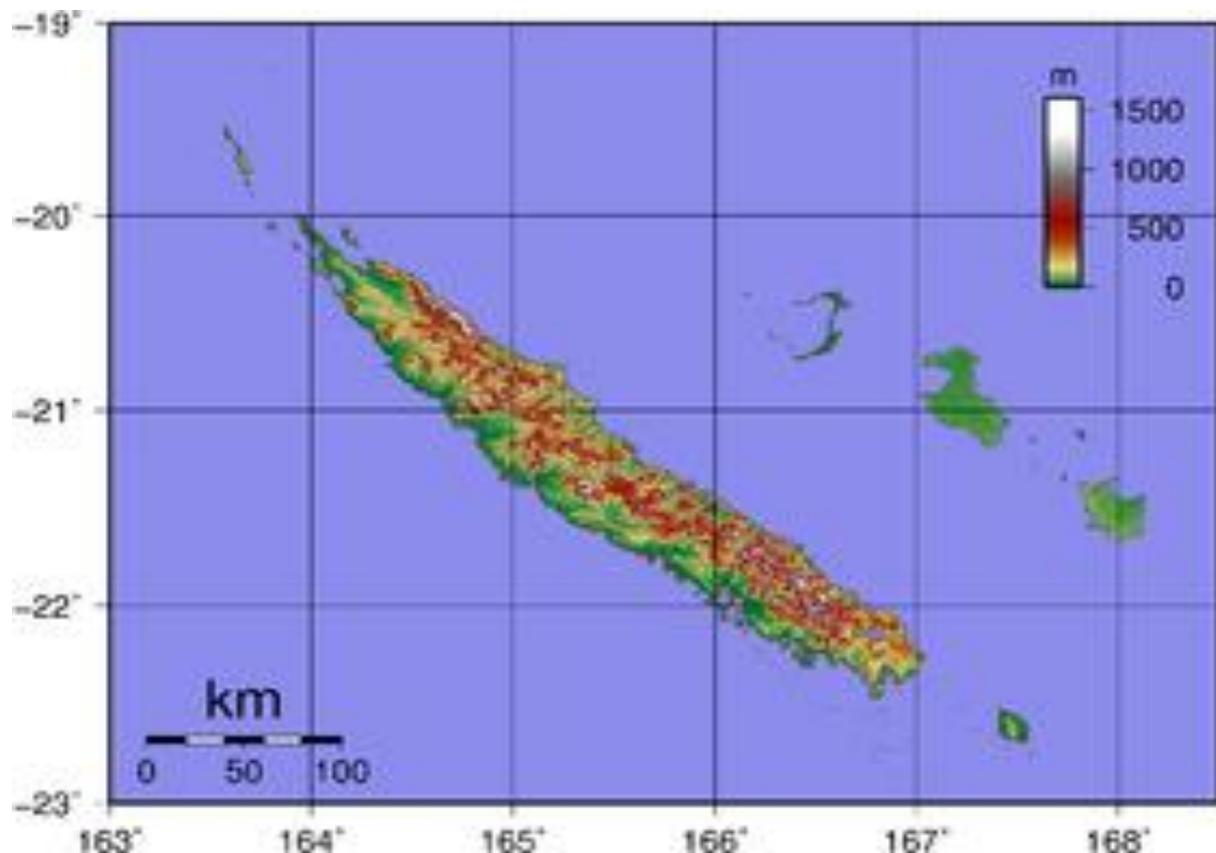


Ilustración 1.4: Topografía de Nueva Caledonia [10]

1.2.2. La Grande Terre

El paisaje está organizado por una suma de pequeñas cuencas transversales. Los ríos y las capas freáticas constituyen el recurso principal de agua sobre La Grande Terre. Su recarga depende de la intensidad y frecuencia de las lluvias.

Las precipitaciones presentan una variabilidad en el espacio y en el tiempo, debido al relieve y a la exposición de los vientos dominantes. La media anual es de 1850 mm. Los valores máximos (4000 mm/año) se miden en la costa este, la cadena montañosa, y el sur, mientras que los mínimos (<750 mm/año) se encuentran en la costa oeste. Los caudales de los ríos también son variables: en la costa este, son globalmente superiores a 4 litros/segundos/km², en el sur entre 2 y 10 litros/segundos/km², y en la costa oeste suelen ser por debajo de 2 litros/segundos/km² [9].

Estos valores son sometidos a variaciones temporales. Destacan dos temporadas:

- La temporada cálida, de enero a marzo. Está caracterizada por precipitaciones abundantes y temperaturas elevadas.
- La temporada fresca, de junio a septiembre. El clima está más seco y fresco, aunque existen episodios lluviosos durante este periodo.

La transición entre las dos temporadas no es fácil de distinguir y se caracteriza por un periodo de sequía de agosto a noviembre (muy pocas precipitaciones y temperaturas cada vez más elevada) y otro periodo en fin de temporada cálida/principio de temporada fresca, favorable a episodios tormentosos y formación de ciclones.

1.2.3. Las Islas de la Lealtad

Maré, Lifou, Ouvéa y Tiga tienen características comunes. Son islas de naturaleza calcárea, con un suelo permeable. El agua procedente de la lluvia se filtra a través del suelo calcáreo y se acumula en una película de agua dulce. La capa de agua dulce flota encima del agua del mar, que es más densa. En consecuencia, por sus características geológicas, las Islas de la Lealtad no poseen ninguna red hidrográfica de superficie. La lenteja de agua dulce es el único recurso, salvo a un impluvium (tanque de recuperación de agua pluvial) en Tiga, y una planta desalinizadora de destilación en Ouvéa.

Estudios [10] han demostrado que el recurso constituido por la capa de agua dulce podría ser suficiente a medio y largo plazo [programa ADAGE, desarrollado por el IRD]. Sin embargo, su calidad se puede ver afectada por dos fenómenos: el bombeo excesivo puede implicar una subida de agua salada en los pozos/perforaciones, y, por otro lado, la naturaleza porosa y muy permeable del suelo facilita la infiltración de contaminantes.

Hay que mencionar una particularidad local: la población no paga por el agua (el suministro es gratis salvo el agua procedente de la planta de desalación de Ouvéa). Pues no suele tener las nociones de ahorro, consumo razonable y preservación de los recursos.

1.3. Enfoque sobre Nouméa y sus alrededores

1.3.1. Hidrografía

La capital se encuentra en el sur oeste de la isla principal. La ciudad consiste en una península rodeada por el mar. Cuenta con muchas colinas, la más alta alcanza 167m por encima del nivel del mar. De hecho, en esta colina (Montravel) se encuentra actualmente el tanque reserva de agua. El resto de los alrededores (Mont Dore, Dumbéa y Païta) es mucho más extenso, e incluye también montañas, pero las casas suelen encontrarse en las explanadas, cerca del mar (entre 0 y 20 kilómetros).

La red hidrográfica es casi inexistente en la península de Nouméa, pero sí se encuentra agua en abundancia en los alrededores: en el valle de la Yahoue en el municipio del Mont-Dore, y el río de la Dumbéa. A lo largo de su historia, Nouméa se ha servido del suministro en agua gracias a estas dos reservas. Se construyó una presa en la Dumbéa, permitiendo cubrir las demandas de los municipios de Nouméa y de Dumbéa, y también la demanda de la SLN (Société Le Nickel: planta pirometalúrgica situada en Nouméa). Desde 1998, frente a la expansión de la población y al incremento de la demanda correspondiente, se bombea agua desde la Tontouta, por medio de una tubería de 46km de largo y 1m de diámetro (SADET Aqueduc). En la tabla 1.3 se aprecian los distintos recursos en agua bruta, con los volúmenes procedentes de cada uno en 2012.

Tabla 1.3: Recursos en agua de la ciudad de Nouméa [11]

<i>Recurso</i>	<i>Tipo</i>	<i>Volumen 2012</i>
<i>Presa Dumbéa</i>	Agua de superficie	16 323 641 m ³
<i>Perforación Val fleuri</i>	Agua subterránea	44 873 m ³
<i>Perforación Trou des nurses</i>	Agua subterránea	70 704 m ³
<i>Compra SADET Aqueduc</i>	Agua subterránea	607 533 m ³

Se debe notar que el 96% del agua que sirve para la producción de agua potable es de superficie, la cual es mucho más vulnerable al mal tiempo, particularmente los ciclones, que llevan a un deterioro de sus características (turbiedad, bacteriología, color, etc.).

1.3.2. Doniambo – SLN

Se trata de una planta piro-metalúrgica ubicada en Nouméa (ver ilustración 1.2). El agua interviene en varias fases del proceso [12]: las unidades de tratamiento del mineral (UTM) en Népoui (en el sitio de las minas) que limpia el mineral, y también un uso en la propia planta piro metalúrgica en Nouméa. El consumo de agua en el proceso de limpieza por las UTM es desconocido. Sin embargo, el consumo de la dicha planta de Doniambo sí se conoce, siendo cliente de la Calédonienne des Eaux (CDE), la empresa que se encarga de la producción, el transporte y la distribución de agua en Nouméa (ver tabla 1.4).

1.3.3. Consumo de agua

Según los datos procedentes del informe del ejercicio 2012, tenemos el consumo de agua de los clientes, con la distinción entre domésticos e industriales (agua bruta).

Tabla 1.4: Consumo de agua 2012 en Nouméa [11]

	Domésticos	Industriales (agua bruta)	Municipales	Total del servicio
Volumen vendido en 2012 (m ³)	9 850 331	1 141 626	519 951	11 511 908
Porcentaje	85,6%	9,9%	4,5%	
Consumo (m ³ /año/cliente)	303	570 813	1 857	

Se destaca un consumo por cliente (en el caso de clientes domésticos) muy elevado (303 m³/año/cliente), considerando tres personas por cliente en media, es tres veces más de lo que se suele encontrar en Francia.

Hay que notar que el 9,9% del agua vendida es para dos clientes industriales (entre 32 759 clientes en total). Entonces, la parte de suministro para los industriales (siendo el principal la SLN) es muy significativa.

Además, tenemos acceso a la evolución de estos valores a lo largo de los años desde 2005:

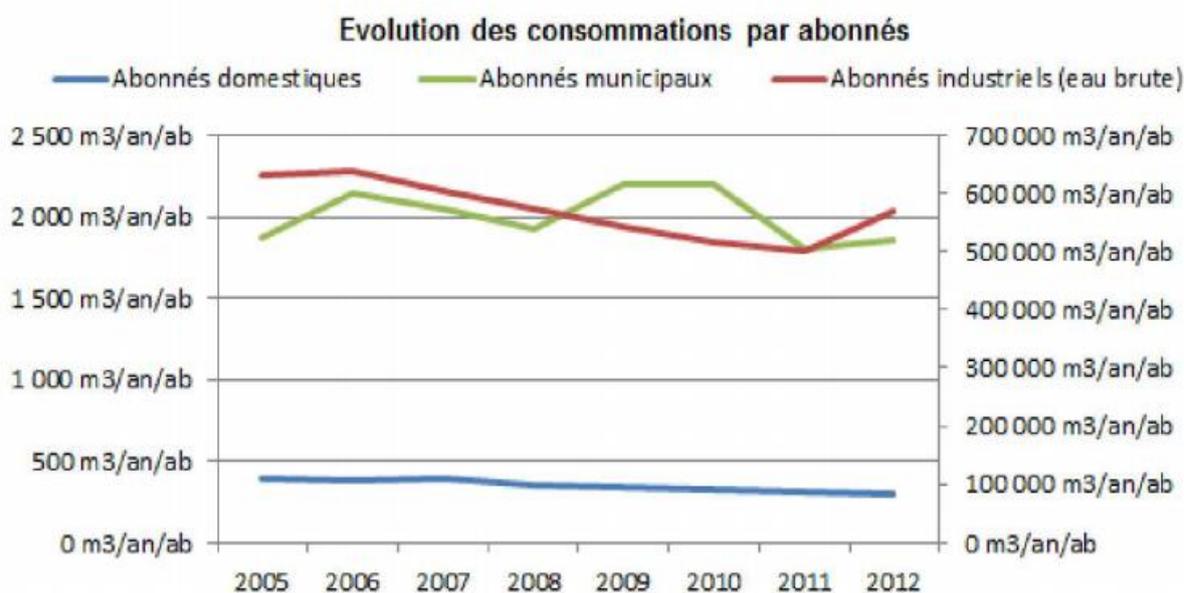


Fig.1.1: Evolución del consumo por tipos de cliente entre 2005 y 2012 [11] (Izquierda: particulares, derecha: industria y consumo municipal)

Se aprecia una disminución del consumo por cliente de los domésticos desde 2007, y un aumento del consumo en agua bruta de los industriales desde 2011, lo cual equilibra el total vendido.

1.4. Introducción a la desalación por ósmosis inversa

La ósmosis inversa es la tecnología más empleada en la desalación de agua, tanto de mar como salubre. Este proceso está ya muy bien desarrollado y se encuentra en numerosos lugares del mundo donde los recursos en agua potable son limitados. Dentro de las otras tecnologías para desalación, se destacan también desalación por destilación, mediante varias etapas en las que el agua del mar se evapora y se condensa en agua dulce, evaporación súbita, también conocida como destilación flas multi-etapa, y electrodiálisis, basado en la migración de iones en una solución iónica en la cual pasa una corriente eléctrica. En la tabla 1.5 se aprecia la capacidad instalada por tecnología, dentro de las 15988 plantas desalinizadoras en el mundo (78.4 millones m³/día).

Tabla 1.5: Capacidad instalada en el mundo por tecnología.

Tecnología	Proporción de la capacidad total instalada (%)
Ósmosis inversa	61.1
Destilación flas multi-etapa	25.7
Destilación multi-efecto	8.3
Electrodiálisis	3.2
Otras	1.7

En cuanto a la distribución geográfica, el Mediterráneo y el Medio Oriente son las regiones en las que se predice la evolución más importante. Siguen Asia y América donde también se desarrolla la desalación de agua. Dentro de Europa, la mayoría de las plantas desalinizadoras se han construido en España. Se debe al programa AGUA desarrollado por España.

1.4.1. Descripción física del fenómeno

El proceso de desalación por ósmosis inversa se basa en el uso de membranas semipermeables, que dejan pasar un disolvente, reteniendo las sales disueltas, obteniendo así agua de menor concentración. La ósmosis es un fenómeno natural que opera entre dos soluciones de distintas concentraciones. Si estas dos soluciones están separadas por una membrana semipermeable, va pasando el disolvente hacia la parte de mayor concentración, equilibrando así las concentraciones entre las dos soluciones. No se necesita aporte de energía. Cuando existe una membrana semipermeable que separa la disolución del disolvente puro, el equilibrio se alcanza cuando la presión en el lado de la disolución tiene un cierto valor llamado presión osmótica. Al revés, si se aplica una presión mayor de dicha presión osmótica en la parte de mayor concentración, se puede conseguir el desplazamiento del disolvente en el sentido contrario, es decir desde el lado de mayor concentración hasta el de menor concentración. Eso se denomina ósmosis inversa. Permite conseguir agua desalinizada a partir de una alimentación en agua de mar o salubre, como se aprecia en la figura 1.2. Las presiones de operaciones son del orden de 17-27 bar para agua salubre, y dentro de un rango de 52-69 bar para agua de mar.

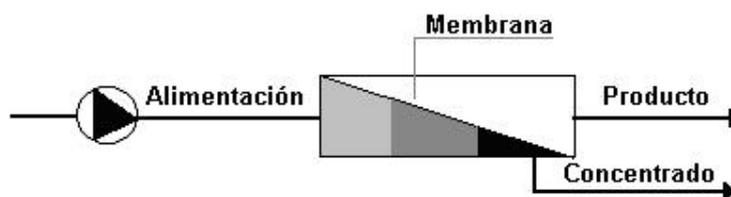


Fig. 1.2: Representación esquemática de la ósmosis inversa [13]

1.4.2. Etapas del proceso

A continuación, se da una breve descripción de las diferentes etapas que constituyen el proceso de desalación por ósmosis inversa, a una escala industrial. Los elementos constitutivos del núcleo productivo, a saber las bombas, los elementos de membrana, y el sistema de recuperación de energía, así como las distintas configuraciones posibles, serán descritos con más detalles en el capítulo 2. Las etapas consisten en:

- *Toma de agua de mar.* Puede ser de dos tipos: toma abierta o de pozos playeros. Los pozos suministran agua de mejor calidad, con menor turbiedad, pero la cantidad suministrada está limitada por el área de las perforaciones.
- *Pretratamiento.* Consiste en el proceso físico-químico para impedir incrustaciones y ensuciamiento. Dependiendo de las características del agua de suministro, se pueden usar filtros o membranas (más recientemente) de diferentes tipos.
- *Bombeo de alta presión.* Cumple la función de presurizar el agua de alimentación procedente de la etapa de pretratamiento a la presión de operación. La bomba de alta presión puede bombear el flujo de alimentación en totalidad, o parcialmente en el caso de que existe un sistema de recuperación de energía.
- *Elementos de membrana.* Es el elemento que lleva a cabo la función de desalación. Se usa hoy una configuración espiral. Entra el agua de alimentación a la presión de operación (conseguida por la bomba de alta presión) y salen dos corrientes: (1) el producto final, o agua desalada, denominado permeado, y (2) el concentrado, agua con concentración en sales alta, rechazado al mar. Los elementos de membrana van montados en serie, formando un tubo de presión (suele ser constituido por 7 elementos). Varios tanques de tubos conectados en paralelo definen un tren de ósmosis inversa.
- *Sistema de recuperación de energía.* Con el objetivo de reducir el coste de operación debido al consumo energético, se puede implementar un sistema de recuperación de energía. Se trata de aprovechar la energía del concentrado que sale todavía a una presión elevada. Existen dos tecnologías, presentadas en el capítulo 2, el intercambiador de presión y el "turbo-charger".
- *Post-tratamiento y almacenamiento del producto.* El permeado está desinfectado, remineralizado y ajustado a los requisitos locales en vigor para agua potable.
- *Descarga del concentrado.* A la salida del sistema de recuperación de energía, el concentrado rechazado está vertido en el mar.

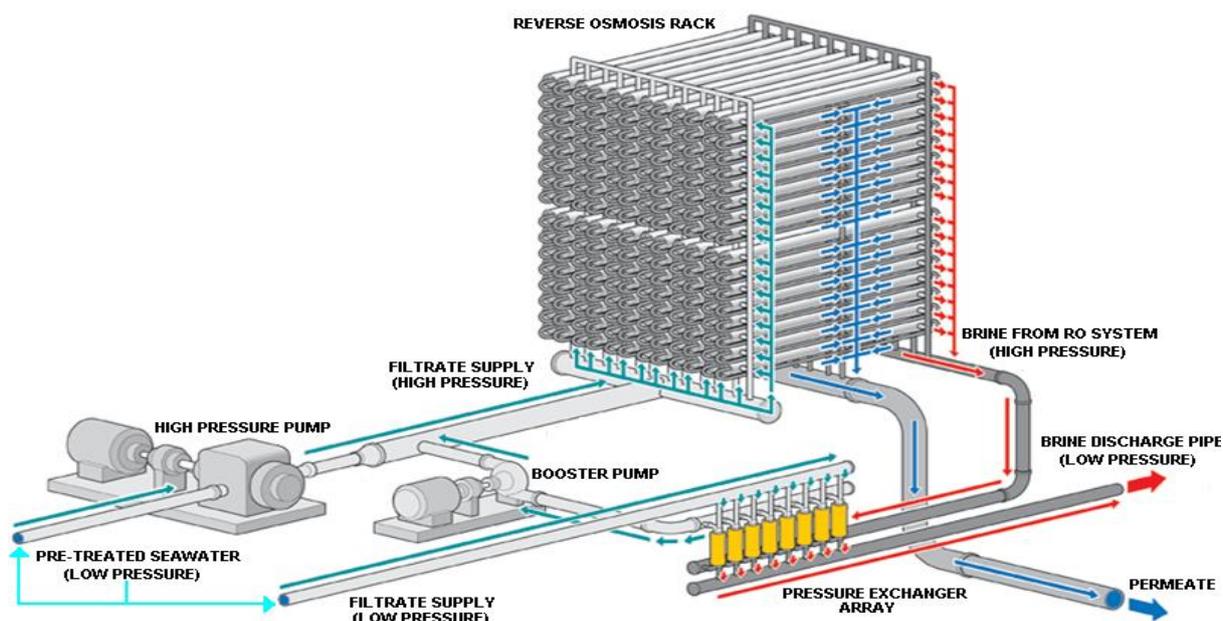


Figura 1.3: Esquema de los componentes principales de una planta de desalación por ósmosis inversa [14]

1.4.3. Consumo energético

A lo largo del desarrollo de la tecnología, se ha reducido el consumo energético de las plantas de desalación por ósmosis inversa. Al final de los años 70 se trataba de un consumo alrededor de 20 kWh/m^3 para plantas de desalación de agua de mar. Desde entonces, se ha reducido de diez veces, para alcanzar un consumo medio de 2 kWh/m^3 en los años 2000. Un rango típico para plantas de media-alta capacidad es 2.2 hasta 2.5 kWh/m^3 . El coste de la energía impacta en el coste total de la planta, entre el 30 y 50 % según las fuentes. Está fuertemente influido por la capacidad de la planta (depende también de la calidad del agua de alimentación, de los productos químicos de pre y post tratamiento y del ratio de recuperación de energía). El consumo específico, y por lo tanto el coste global de producción de agua, se reduce al aumentar la capacidad instalada. La tabla 1.6 suministra una aproximación del coste de la inversión total en función de la capacidad de la planta.

Tabla 1.6: Inversión específica en función de la capacidad de la planta.

Capacidad (m^3/d)	Inversión, € / (m^3/d)
< 5,000	961.62
5,000 – 10,000	856.44
10,000 – 25,000	751.27
25,000 – 40,000	661.11
40,000 – 60,000	611.53
60,000 - 80,000	588.99
80,000 - 100,000	525.89
> 100,000	506.35

1.4.4. Coste del agua comercializada

De la misma manera que para el consumo energético, el precio del agua por m^3 producidos se ha reducido a lo largo de los años. La tabla 1.7 ilustra dicha evolución, con plantas puestas en marcha en diferentes años. También hay que tener en cuenta las capacidades que difieren, las características del agua de alimentación y las legislaciones locales respectivas. El mismo fenómeno que para el consumo energético destaca: a mayor capacidad, menor precio del agua.

Tabla 1.7: Coste del agua comercializada por varias plantas.

<i>Ubicación de la planta</i>	<i>Puesta en marcha</i>	<i>Capacidad (m^3/d)</i>	<i>Precio del agua ($\\$/m^3$)</i>
Larnarca, Chipre	2001	56,000	0.83
Eilat, Israel	2003	10,000	0.81
Tampa Bay, Florida, EEUU	2003	94,600	0.55
Fujairah, Emiratos Árabes Unidos	2005	170,500	0.87
Ascalón, Israel	2005	320,000	0.53

El coste de agua se calcula en función del coste de capital anualizado o amortizado, el coste de operación y mantenimiento (O&M) anual, la capacidad de la planta y el factor de disponibilidad. Wittholz [15] propone una metodología interesante para analizar los costes de una planta de desalación, proporcionando la siguiente relación:

$$\text{Coste del agua} = \frac{\text{Coste Capital amortizado} + \text{Coste de O\&M anual}}{\text{Capacidad de la planta} \cdot \text{Disponibilidad}} \quad (1)$$

En el capítulo 2 se aborda con más detalle el tema de los costes de una planta de desalación, destacando cada uno con un ejemplo concreto.

2

Características y costes de una planta de desalación por ósmosis inversa

2.1. Descripción del núcleo productivo

2.1.1. Elementos constructivos

El núcleo productivo está compuesto por las bombas, los elementos de membrana, y el sistema de recuperación de energía. A continuación, se presenta cada elemento:

Bomba de alta presión. Bombea el agua de alimentación hacia los elementos de membrana para conseguir una presión de operación del orden de 5-6 MPa. El concepto asociado se denomina fuerza motriz del paso de solvente. Corresponde a la diferencia entre la presión neta y la presión osmótica. La fuerza motriz del paso de solvente disminuye desde la entrada del agua de alimentación hacia la salida del permeado. En el caso de que haya un sistema de recuperación de energía tipo intercambiador de presión, la bomba de alta presión solo bombea una parte de la alimentación ya que la otra parte pasaría por el sistema de recuperación de energía. Una bomba suele alimentar a un tren de ósmosis inversa (definido más adelante) o puede suministrar agua de alimentación a varios trenes dispuestos en paralelo.

Membranas. Cumplen la función de desalación. Las membranas se agrupan en serie dentro de los tubos de presión, los diversos tubos en paralelo constituyen el bastidor de membranas. El agua de alimentación llega a una presión por encima de la presión osmótica por lo cual el disolvente se mueve de la parte de mayor concentración hacia la de menor concentración. La membrana retiene la mayor parte de las sales disueltas, así se obtienen dos soluciones: una con bajo contenido de sal (permeado), otra con alto contenido de sal (concentrado). Actualmente se usa la configuración espiral. Un elemento

se constituye de una tubería perforada (tubo de permeado), membranas y separadores enrollados alrededor de dicha tubería. El conjunto está sellado con una cubierta. El agua de alimentación llega al exterior del tubo. Mientras circula el agua de alimentación axialmente al tubo, una parte se infiltra hacia el interior, pasando a través de las membranas y dejando la mayoría de las sales disueltas a las afueras del tubo. Entonces sale el permeado por el interior del tubo, y el concentrado por el exterior como se puede apreciar en la ilustración 2.1:

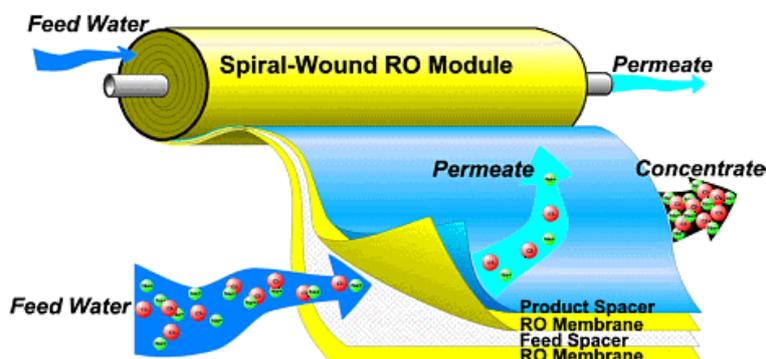


Ilustración 2.1: Movimientos de los distintos flujos en un elemento espiral

Los elementos de membrana se ensamblan en serie dentro de un tubo de presión. Así, la salida de uno constituye la entrada del siguiente. Se suele mezclar el permeado de la serie de elementos y colectarlo a la salida del tubo de presión. También se puede colectar en ambos lados, obteniendo así dos calidades distintas de producto. Actualmente, en el comercio se encuentran elementos de un diámetro de 8 pulgadas y de 16 pulgadas. En el primer caso se suelen colocar entre 7 y 8 elementos en serie mientras que en el segundo caso se usan en torno a 4 elementos. La interconexión entre elementos puede ser axial, radial o rotacional (ver ilustración 2.2).

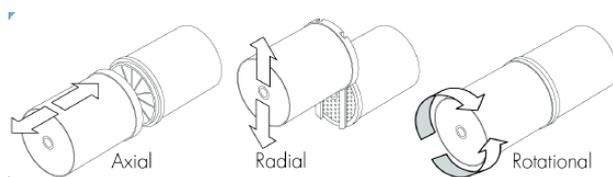


Ilustración 2.2: Interconexión de elementos [16]

Varios tubos de presión conectados en paralelo definen un **tren de ósmosis inversa**.

Sistema de recuperación de energía. El concentrado que sale del tren de ósmosis inversa (TOI) sigue estando a presión elevada por lo cual se puede aprovechar dicha energía antes de devolver el concentrado al mar. El objetivo es ahorrar energía en la etapa de bombeo de agua de alimentación. Para lograrlo, existen dos tecnologías:

- Intercambiador de presión (IP): el agua de alimentación se divide en dos flujos, uno pasando por la bomba de alta presión (corriente A) y el otro dirigiéndose al IP

(corriente B). El IP consiste en una cámara isobara donde un fluido comunica parte de su energía (en forma de presión) al otro fluido. Así el concentrado transmite energía a la corriente B antes de ser expulsado al mar. La corriente B tiene que pasar luego por una bomba “booster” (BB) para alcanzar la presión de operación y mezclarse con la corriente A que haya estado bombeada previamente por la bomba de alta presión (BAP). El conjunto bomba de alta presión (cuyo tamaño es menor ya que opera con un caudal reducido) y bomba de circulación consume menos que una sola bomba de alta presión operando con la totalidad del flujo de alimentación.

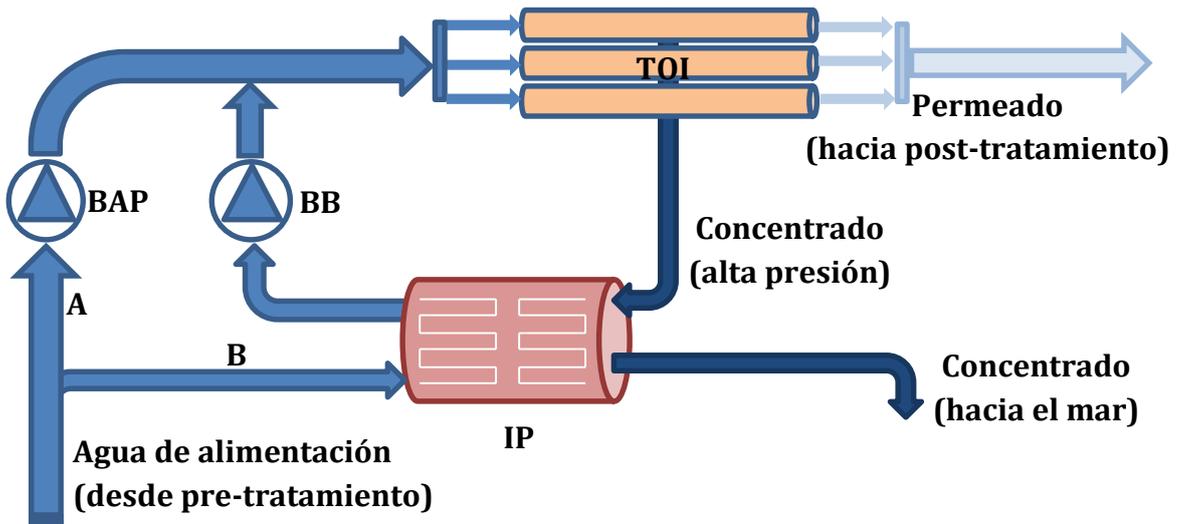


Figure 2.1: Proceso de OI con sistema de recuperación basado en intercambiador de presión

- Turbocharger (TC): el concentrado saliendo del TOI está turbinado en el TC, transmitiendo así energía al eje acoplado para bombear el agua de alimentación. En este caso, el TC trabaja en serie con la BAP. Se bombea la totalidad del flujo de alimentación, y no una fracción como en el caso anterior, pero se reduce el incremento de presión que debe suministrar la BAP ya que una parte procede del TC. De este modo, se consigue reducir el tamaño de la BAP.

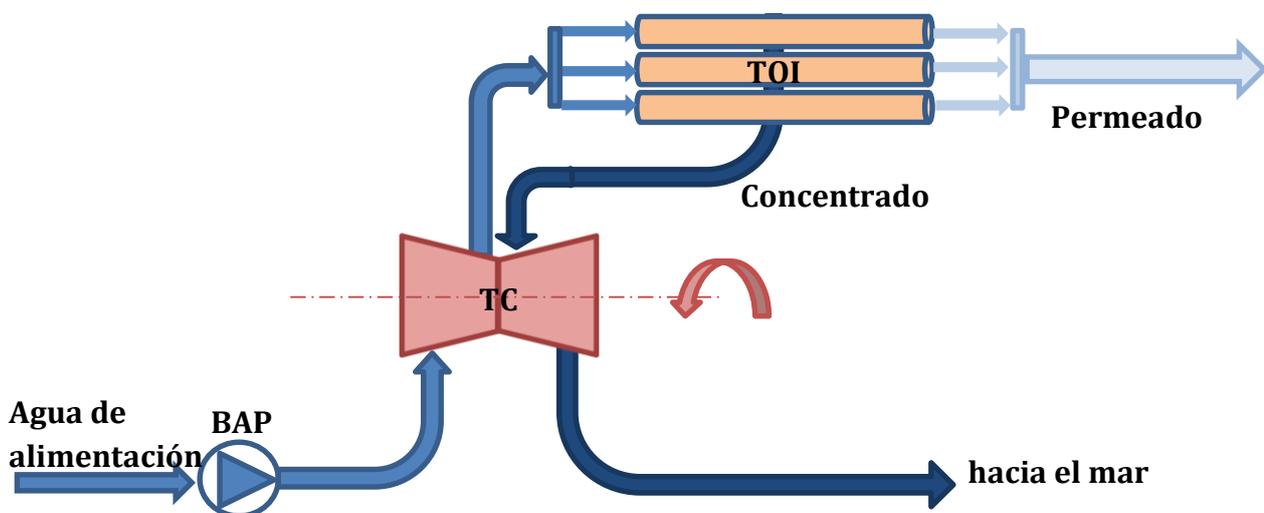


Figure 2.2: Proceso de OI con sistema de recuperación basado en turbocargador

2.1.2. Configuraciones

Las figuras 2.1 y 2.2 ilustran una configuración básica con un solo paso y una etapa. Sin embargo, por motivos de calidad (sobre todo en lo que se refiere al contenido de boro, lo cual se explica en el apartado 2.1.3), según la naturaleza y composición del agua, las restricciones y normativas en aplicación, se pueden usar configuraciones más complejas. El permeado procedente del tren de ósmosis inversa para agua de mar (OIAM) puede ser tratado otra vez a través de un segundo paso. Considerando que en el primer paso ya se le habrá quitado gran parte de las sales disueltas, las membranas que se usan para el segundo paso son membranas de ósmosis inversa para agua salobre (OIAS). Dicho proceso se realiza a presión menor que en el caso con agua de mar. En consecuencia, la bomba que se coloca entre los dos pasos es una bomba de baja presión (BBP) y no de alta. Según la calidad de permeado exigida, aparecen tres sub-configuraciones. El producto final puede ser recolectado:

- En totalidad al final del segundo paso: *configuración dos pasos (fig. 2.3)*
- Una parte al final y otra procedente del primer paso: *configuración dos pasos parcial (fig. 2.4)*
- Una parte al final y otra procedente del primer paso, en el cual salen dos flujos de permeado (dos calidad distintas), la corriente con menor concentración (alta calidad) siendo la que se mezcla con el producto final: *configuración dos pasos con "split-partial" (fig. 2.5)*

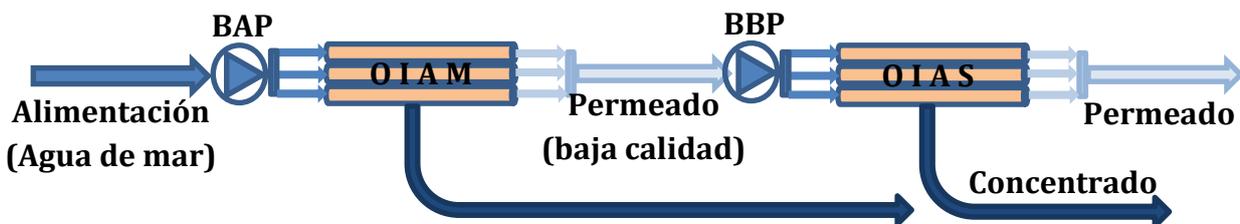


Figure 2.3: Configuración dos pasos

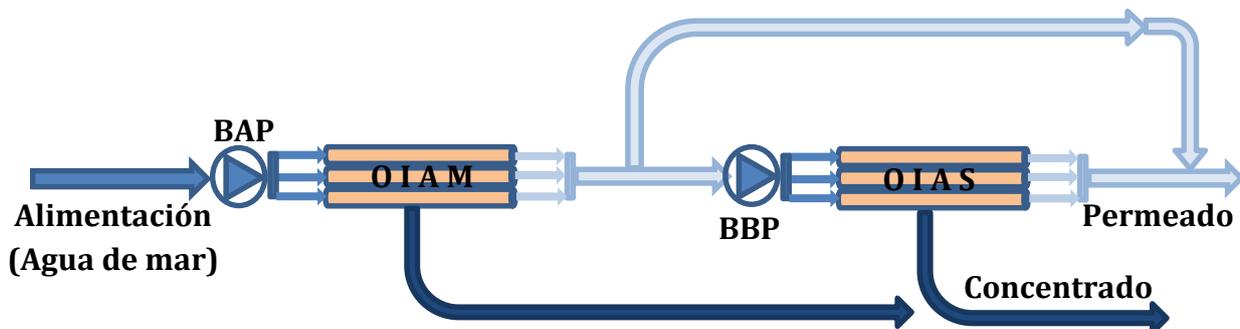


Figure 2.4: Configuración dos pasos parcial

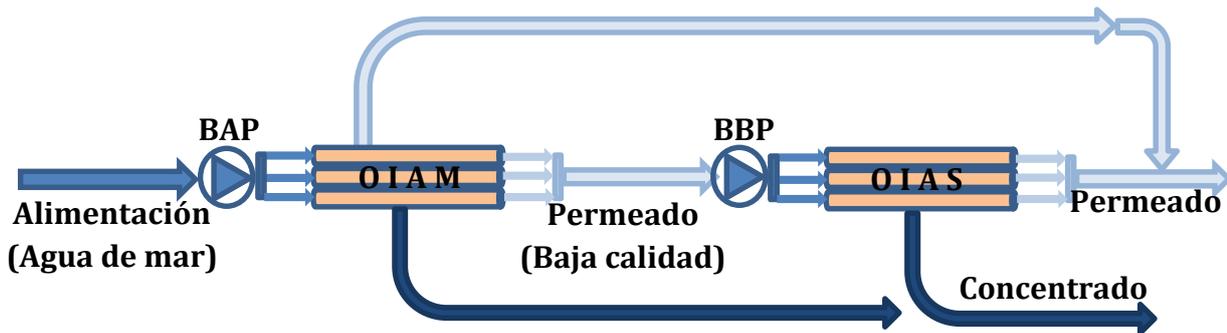


Figure 2.5: Configuración dos pasos con split-partial

Además, el segundo paso siendo de membranas de agua salobre, el concentrado procedente de este paso puede hacerse pasar por nuevas membranas. Se trataría de una segunda etapa (fig. 2.6). No se deben confundir segundo paso y segunda etapa. En el caso de un segundo paso, se trata el permeado (fig. 2.3, 2.4 y 2.5). En el caso de una segunda etapa, se trata el concentrado (fig. 2.6). La alimentación puede ser directamente una toma de agua salobre (previamente pre-tratada) o el permeado de baja calidad procedente de un primer paso (fig. 2.4), lo cual tiene características similares a agua salobre en términos de concentración de sal. En este último caso, la configuración con segundo paso viene asociada a una configuración con segunda etapa.

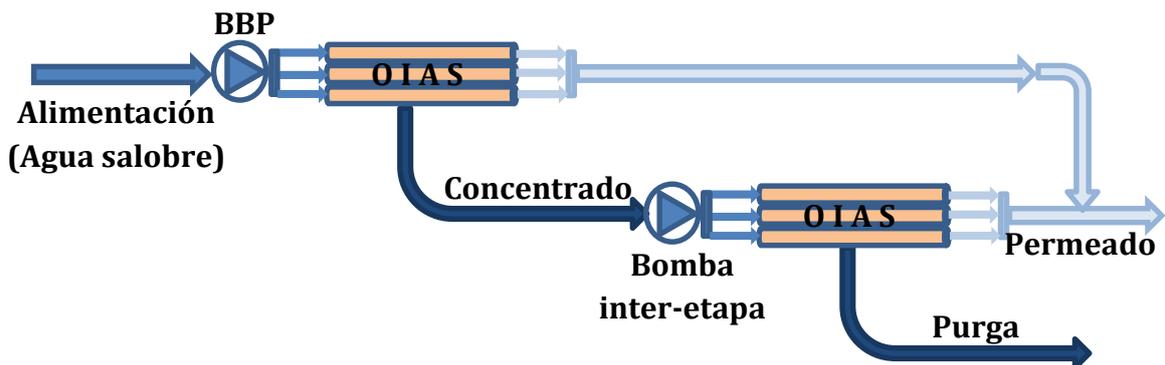


Figure 2.6: Configuración dos etapas

2.1.3. Eliminación de boro: efectos sobre el diseño

El boro es un elemento naturalmente presente en el medioambiente. La concentración de boro en el mar tiene un impacto directo sobre el desarrollo de la tecnología de ósmosis inversa para agua de mar. Los niveles de concentración pueden variar mucho de una zona a otra, situándose en un rango de 0.5-9.6 mg/L [17] por lo cual hay que referirse a los datos localmente disponibles. Globalmente, la concentración media de boro en el mar es de 4.6 mg/L [18]. Dependiendo del lugar y de las características locales, la concentración en boro de un sitio determinado puede alejarse bastante de dicho valor medio. Por ejemplo en el mar mediterráneo se puede encontrar concentraciones hasta 9.6 mg/L. Además, la actividad industrial puede afectar al nivel de boro presente. En el medioambiente, el boro se encuentra en la forma de ácido bórico. Aunque el boro en cantidad ínfima es necesario en el desarrollo del humano, la ingestión de grandes cantidades resulta ser tóxica. En consecuencia, la extracción de boro es un aspecto

fundamental a la hora de diseñar un proceso de ósmosis inversa a partir de agua de mar para el suministro de agua potable.

La legislación varía de un país a otro, dependiendo de los niveles de concentración local, la salud humana y medioambiental, las tecnologías de extracción de boro disponibles y costes asociados. La tabla 2.1 proporciona valores límites del contenido de boro en el agua potable para varios países.

Tabla 2.1: Regulación sobre el contenido límite en boro del agua potable [19]

Regulations and guidelines (mg/L)	Time of issuing	1990	1997	1998	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2009	
	WHO		→ 0.3	→	0.5	→							
European Union (EU)		- - - - - →		1.0	→								
Canada		- - - - - →			→		5.0	→					
New Zealand		- - - - - →			1.4	→							
Australia		- - - - - →						4.0	→				
Israel		- - - - - →						0.3	→				
Singapore		- - - - - →				1.0	→						
Abu Dhabi		- - - - - →				1.5	→						
U.S. (California)		- - - - - →				1.5	→						
Japan (Fukuoka)		- - - - - →			1.5	→							
Ashkelon (Israel)										≤0.4			
Palmahim (Israel)										≤0.4			
Dhekelia (Cyprus)				<1									
Larnaca (Cyprus)						<1							
Sydney (Australia)												<1	
Perth (Australia)										≤2			

Aparecen diferencias fundamentales entre los países, destacándose valores dentro de un rango muy amplio: 0.3 – 5 mg/L. La legislación es muy restrictiva en algunos países, Israel por ejemplo con un valor límite de 0.4 mg/L. De hecho la agricultura de limón en Israel está muy desarrollada y el limón resulta ser una planta muy sensible al boro (tolerancia menor de 1 mg/L [20]). En otras áreas, se encuentran tolerancias muy altas: Canadá con 5.0 mg/L o Australia con 4.0 mg/L. Se debe a que en dichas regiones la presencia de boro en el agua no es común. En el caso de Nueva Caledonia, dónde tampoco se encuentra comúnmente boro en el medioambiente, la legislación adoptada acerca de los estándares de agua potable es la de Francia [6], por falta de regulación bien especificada localmente. En consecuencia se considera el valor límite de 1 mg/L (Unión Europea).

Los diseños de plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa deben cumplir con la legislación. Es imprescindible mencionar que el nivel recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) no es obligatorio, por lo cual varios países mantienen regulados valores por encima del aconsejado por la OMS. Además, el valor de 0.5 mg/L establecido en 1998 (tabla 2.1) ha sido revisado e incrementado a 2.4 mg/L en la cuarta edición de recomendaciones de calidad para agua potable publicado por la OMS en 2011 [17]. Se debe a la falta de conocimientos sobre los efectos y daños posibles para la salud humana.

Los procesos involucrados en la planta de desalación por ósmosis inversa consisten en:

- La etapa de pre-tratamiento: uso de membranas de Ultrafiltración (UF), Microfiltración (MF), o Nanofiltración (NF)
- El primer paso del núcleo productivo: membranas de ósmosis inversa para agua de mar (OIAM). Raramente puede ir acoplado con una segunda etapa de OIAM
- El segundo paso (en el caso correspondiente): membranas de ósmosis inversa para agua salobre (OIAS). Puede ir acoplado con una segunda etapa de OIAS.

Las membranas de OI, aunque tienen una tasa de extracción de sodio muy alta, siguen teniendo dificultades en cuanto al boro. El nivel de paso de boro depende principalmente del tipo de membrana y de las condiciones de operación, la temperatura y el pH siendo los dos factores más influyentes. La figura 2.7 proporciona una comparación del porcentaje de paso de boro entre membranas de NF, de OIAM y de OIAS.

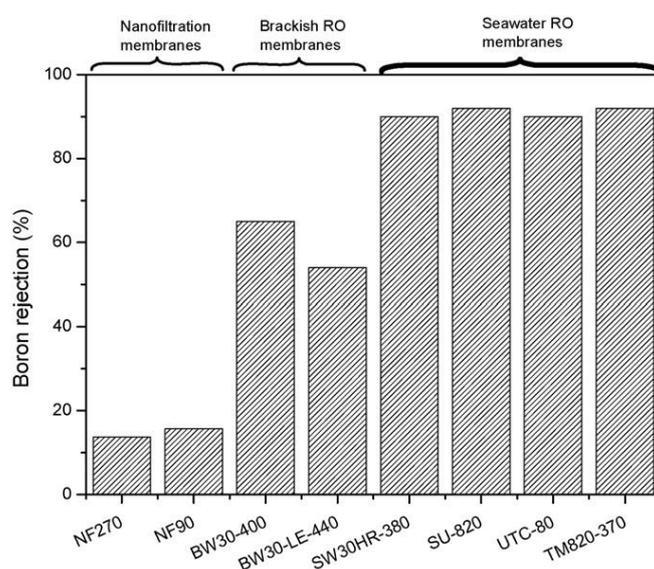


Figure 2.7: Nivel de paso de boro en función de la tecnología usada (NF, OIAS, OIAM) [19]

Los ensayos suelen realizarse a un pH por debajo de 9, valor típico para membranas de OI [19]. A dicho nivel de pH, el boro se encuentra en forma de ácido bórico, de un tamaño muy pequeño, por lo cual resulta difícil su eliminación. Como se puede apreciar, las membranas de NF tienen mejor eficiencia para quitar el boro, por lo cual las investigaciones recientes se enfocan sobre la eliminación de boro en membranas de OI. En efecto, el uso de membranas con alta tasa de eliminación de boro permitiría configuraciones de un solo paso, reduciendo ambos costes de inversión y de operación. Lo usual actualmente es el uso de al menos dos pasos. Las configuraciones se complican aún más cuando la legislación impone un valor muy restrictivo. Un ejemplo significativo es la planta de desalación por ósmosis inversa de Eilat en Israel, cuya configuración consiste en un sistema innovador de extracción de permeado por ambos extremos (Split-partial) (fig. 2.8). Se trata de una configuración dos pasos con split-partial (fig. 2.5) con 3 etapas adicionales para el tratamiento del concentrado procedente del segundo paso de OIAS.

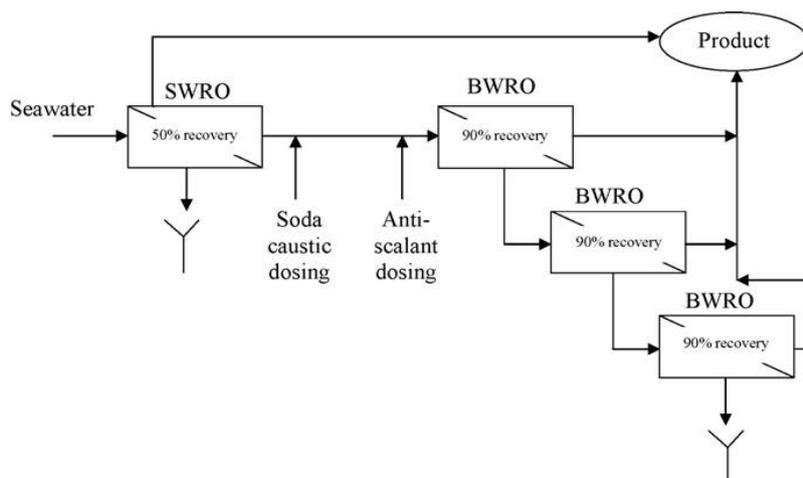


Figure 2.8: Diagrama de flujo de la planta de Eilat, Israel [21]

Con el objetivo de mejorar la eliminación de boro, se incrementa el pH entre el primer paso de OIAM y el segundo paso de OIAS. El aumento de pH también favorece la precipitación de sales disueltas por lo cual hace falta introducir productos químicos anti-incrustaciones.

2.2. Estimación de costes de una planta de desalación

2.2.1. Introducción

El apéndice B del libro *The Guidebook to Membrane Desalination Technology* de Mark Wilf [22] proporciona un ejemplo de la estimación de los costes de una planta desalinizadora, basándose en datos procedentes de plantas existentes y de tamaño similar. Dichos costes se dividen en tres categorías: el coste capital, el coste de operación y mantenimiento, y el coste del agua (o precio de venta) para garantizar la recuperación de la inversión. Las entradas para llevar a cabo la estimación son diversas e incluyen parámetros tanto topográficos, energéticos, económicos y legislativos. A continuación, se presentan dichas entradas y salidas a través del ejemplo propuesto.

2.2.2. Entradas del proceso de estimación

Capacidad y disponibilidad de la planta. La planta produce 40000 m³/día, teniendo una capacidad máxima de 48000 m³/día y una producción mínima de 32000 m³/día. Se supone una disponibilidad del 100%. Además, la planta opera con una tasa de recuperación entre 45 y 50%.

Ubicación de la planta, toma de agua y descarga. Se trata de una parcela de 20000 m² situada en una zona comercial. Está a 10 m por encima del nivel medio del mar, y a una distancia de 800 m de la costa. La toma de agua se extiende hasta 200 m en el océano después de la costa. La descarga consiste en una tubería de 950 m, incluyendo 150 m que

se extienden el océano. Los últimos 50 m están equipados con difusores para facilitar la descarga y dilución del concentrado.

Características del agua de entrada. La tabla 2.2 proporciona los valores de los parámetros claves para el diseño de la toma de agua.

Tabla 2.2: Características de la toma de agua [22]

Parameter	Design minimum value	Design maximum value	Design average value
Intake flow, m ³ /d (mgd)	68,000 (18.0)	114,000 (30.1)	84,000 (22.2)
Salinity (TDS), mg/L	32,500	34,500	33,500
Chloride, mg/L	16,900	20,800	18,000
Bromide, mg/L	52	79	73
Boron, mg/L	3.6	5.0	4.5
Temperature, °C	9	26	18
Turbidity, NTU	0.2	24	2
Total suspended solids, mg/L	0.5	30	4
pH	7.3	8.1	7.8

Especificaciones de calidad del producto. La tabla 2.3 proporciona los valores especificados para el agua producto.

Tabla 2.3: Especificaciones respecto a la calidad del producto [22]

Quality parameter	Analytical method ¹	Sampling		Units	Concentration limits	
		Sample period ²	Sample method		Central tendency ³	Extreme ⁴
Total dissolved solids	2540 °C	1 year	Weekly grab	mg/L	350	400
Chloride	4110 B	1 year	Weekly grab	mg/L	180	210
Bromide	4110 B	1 year	Weekly grab	mg/L	0.5	0.8
Boron	3120 B	1 year	Weekly grab	mg/L	No Limit	1 ⁵
Turbidity	2130 B	1 month	Continuous ⁶	NTU	0.3	0.5

Instalaciones de tratamiento. La planta tiene los siguientes equipos:

- Tubería de toma de agua - polietileno de alta densidad
- Placas de barra – apertura de 100 mm
- Pantallas de entrada – apertura de 10 mm
- Estación de bombeo de entrada equipada con turbo bombas
- Instalación de pretratamiento con cámaras de coagulación y floculación
- Trenes de osmosis inversa (OI) de 8000 m³/día cada uno, cinco de operación y uno de repuesto. Cada tren cuenta con el filtro de cartucho, la bomba de alta presión

acoplada con una turbina Pelton de recuperación de energía, los tanques de presión con elementos de membranas, y las tuberías y equipamientos asociados.

- Sistema de post-tratamiento con filtros de caliza
- Alimentación de productos químicos y sistemas de almacenamiento
- Sistemas de gestión de sólidos
- Edificio de administración y equipos de OI
- Subestación eléctrica
- Elementos auxiliares

Se planea realizar la construcción en 22 meses. Se contratará un préstamo financiero de construcción comercial de una tasa de interés de 5% con un plazo de 20 años. El proceso de obtención de los permisos tardará dos años, ya que se trata de un proyecto de alta complejidad, necesitando previamente una modelización hidrodinámica del área de descarga de la planta y múltiples muestras y análisis del agua de suministro.

Operación de la planta. La planta será controlada en gran parte de forma automatizada con una plantilla de 15 empleados. El coste unitario de la energía se supone de 0.06 \$US/kWh. Los residuos deshidratados procedentes de la limpieza de los filtros se dispondrán en un vertedero sanitario situado en la cercanía de la planta. La solución de limpieza procedente de la limpieza de las membranas será enviada al alcantarillado sanitario. La calidad del concentrado rechazado será medida en el punto de salida de la planta. Su efecto sobre el ambiente marino será monitorizado gracias a tomas y análisis de agua en 10 estaciones alrededor de la descarga.

2.2.3. Salidas: coste capital, coste de operación y coste del agua

Coste capital. El coste capital se puede dividir en cinco categorías:

- Coste capital directo (construcción)
- Ingeniería de proyecto
- Management de proyecto
- Coste de financiación
- Fondo para imprevistos

La tabla 2.4 expone la cantidad asignada a cada una de dichas categorías. Además, aparece el detalle de cada inversión y su contribución en el total (58 000 000 \$US).

Coste de operación y mantenimiento. La tabla 2.5 presenta un desglose de los costes de operación y mantenimiento. El total para el caudal de producción de 40000 m³/día se eleva a 5.84 millón de \$US por año.

Tabla 2.4: Desglose del coste capital [22]

Cost item	Capital cost	
	US\$	% of Total
Direct capital (construction) costs		
1. Site preparation, roads and parking	580,000	1.0
2. Intake	2,760,000	4.8
3. Pretreatment	4,640,000	8.0
4. RO system equipment	18,560,000	32.0
5. Post-treatment	1,160,000	2.0
6. Concentrate disposal	1,450,000	2.5
7. Waste and solids handling	870,000	1.5
8. Electrical and instrumentation systems	1,300,000	2.2
9. Auxiliary and service equipment and utilities	1,160,000	2.0
10. Buildings	1,740,000	3.0
11. Start up, commissioning and acceptance testing	1,160,000	2.0
Subtotal—direct (construction) costs (% of total capital costs)	US\$35,380,000	61.0%
Project engineering services		
1. Preliminary engineering	580,000	1.0
2. Pilot testing	580,000	1.0
3. Detailed design	2,900,000	5.0
4. Construction management and oversight	1,740,000	3.0
Subtotal—engineering services	5,800,000	10.0
Project development		
1. Administration, contracting and management	1,160,000	2.0
2. Environmental permitting	2,610,000	4.5
3. Legal services	870,000	1.5
Subtotal—project development	4,640,000	8.0
Project financing costs		
1. Interest during construction	1,160,000	2.0
2. Debt service reserve fund	2,900,000	5.0
3. Other financing costs	2,320,000	4.0
Subtotal—project financing	6,380,000	11.0
Contingency	5,800,000	10.0
Subtotal indirect capital costs (% of total capital costs)	US\$22,620,000	39.0%
Total capital costs	US\$58,000,000	100%

Coste del agua. El coste del agua consiste en el precio de venta que conviene establecer para recuperar de manera óptima la inversión. Intervienen componentes variables y fijos correspondiendo a los previamente establecidos en los costes de operación y mantenimiento. En la tabla 2.6 aparecen dichos componentes variables y fijos.

Desalación de Agua de Mar por Ósmosis Inversa en Nueva Caledonia

Tabla 2.5: Desglose del coste de operación y mantenimiento [22]

Cost item	Annual O&M costs		
	Million US\$	US\$/m ³ (\$/kgal)	% of Total
Variable O&M costs			
1. Energy	3.24	0.222 (0.840)	55.5
2. Chemicals	0.35	0.024 (0.091)	6.0
3. Replacement of membranes and cartridge filters	0.62	0.042 (0.159)	10.6
4. Waste stream disposal	0.26	0.018 (0.068)	4.4
Subtotal—variable O&M costs	4.47	0.306 (1.158)	76.5
Fixed O&M costs			
1. Labor cost	0.33 MM	0.023 (0.087)	5.7
2. Maintenance	0.38 MM	0.026 (0.098)	6.5
3. Environmental and performance monitoring	0.09 MM	0.006 (0.023)	1.5
4. Indirect O&M costs	0.57 MM	0.039 (0.148)	9.8
Subtotal—fixed O&M costs	1.37 MM	0.094 (0.356)	23.5
Total O&M costs	US\$ 5.84 MM	0.400 (1.514)	100%

Tabla 2.6: Desglose del coste del agua [22]

Cost of water item	Cost of water	
	US\$/m ³ (\$/kgal)	% of Total
Fixed cost component		
1. Capital cost recovery	0.332 (1.257)	45.4
2. Labor costs	0.023 (0.087)	3.1
3. Maintenance	0.026 (0.098)	3.6
4. Environmental and performance monitoring	0.006 (0.023)	0.8
5. Indirect O&M costs	0.039 (0.148)	5.3
Subtotal—fixed water cost component	0.426 (1.613)	58.2
Variable cost component		
1. Energy	0.222 (0.840)	30.3
2. Chemicals	0.024 (0.091)	3.3
3. Replacement of membranes and cartridge filters	0.042 (0.159)	5.7
4. Waste stream disposal	0.018 (0.068)	2.5
Subtotal—variable water cost component	0.306 (1.158)	41.8
Total cost of water	0.732 (2.771)	100%

Estimación del coste del agua para una disponibilidad inferior a 100%. En el ejemplo se ha considerado un factor de disponibilidad de 100%. Sin embargo, la planta real no funcionará el 100% del tiempo y en consecuencia no generará ingresos en el periodo de indisponibilidad. Conviene ajustar el coste del agua para compensar el hecho de que mientras no entran ingresos, siguen existiendo gastos asociados a los costes fijos de la planta. La parte variable del coste del agua es proporcional al caudal y por lo tanto no se ve afectada por la disponibilidad. La parte fija sí se ve afectada ya que es necesario

cubrir los mismos gastos fijos para una producción de agua (y por lo tanto el ingreso) menor.

Suponemos una disponibilidad de 95% en vez de 100%. El volumen de agua generado es de $40000 \times 0.95 = 38000 \text{ m}^3/\text{día}$. En consecuencia, la parte fija del coste del agua se ajusta de $0.426 \text{ \$US}/\text{m}^3$ a $0.426/0.95 = 0.448 \text{ \$US}/\text{m}^3$. Adicionando la parte fija y la variable, obtenemos el nuevo coste del agua: $0.448 \text{ \$US}/\text{m}^3 + 0.306 \text{ \$US}/\text{m}^3 = 0.754 \text{ \$US}/\text{m}^3$. Representa un aumento de 3% en comparación con el coste en el caso de una disponibilidad del 100%.

2.2.4. Tabla de cálculo de costes con Excel a partir de los parámetros claves

Anteriormente se ha presentado un ejemplo que permite exponer los distintos parámetros de entrada con el objetivo de calcular los tres costes que son el coste capital, el coste de operación y mantenimiento, y el coste del agua, procedente de los dos anteriores (fórmula 1, cap. 1, apartado 1.4.4). Aparecen componentes con un impacto preponderante sobre los costes. Por ejemplo, se aprecia en la tabla 2.4 que el coste de construcción representa un 61% del coste capital total. En la tabla 2.5 se aprecia que los costes variables suponen un 76.5% del total anual de los costes de operación y mantenimiento, con una contribución del 55.5% únicamente por la parte energética. A continuación, se identifican los factores claves de entrada que influyen significativamente sobre el cálculo de los costes.

Tamaño del proyecto. El tamaño del proyecto, o capacidad de la planta, tiene un efecto significativo sobre el coste de construcción, y por lo tanto sobre el coste del agua. Se puede reducir de un 50% dicho coste incrementando la capacidad de la planta desde $5000 \text{ m}^3/\text{día}$ hasta un $20000 \text{ m}^3/\text{día}$ [22].

Disponibilidad. El factor de disponibilidad de la planta, como demostrado anteriormente en el ejemplo (apartado 2.2.3), tiende a aumentar el coste del agua cuando se reduce. Se suele diseñar TOI con una capacidad ligeramente superior para compensar el tiempo en el que este parado por razones de mantenimiento como la limpieza, por ejemplo.

Características del agua de entrada. Dentro de los parámetros presentados en la tabla 2.2, los dos factores claves son la temperatura y el TDS (Total Dissolved Solids). Los costes aumentan al aumentar el TDS y se reducen cuando la temperatura aumenta.

Características del agua producto. Las especificaciones con más influencia son las de boro. En efecto en el apartado 2.1.3, se ha mencionado que las configuraciones se complican (Fig. 2.8) cuando la legislación es muy restrictiva en cuanto al contenido de boro. A mayor calidad del agua producto, mayor coste de construcción y de operación.

Consumo energético y coste del recurso. Ya se ha mencionado la contribución de la parte dedicada a la energía en el caso del ejemplo expuesto (55% del coste de operación). El coste energético representa entre 20 y 35% del coste total del agua [22]. El consumo

energético depende principalmente de las características del agua de entrada. El coste del recurso depende de la fuente de energía (red, térmica, eólica, solar fotovoltaica, etc.).

Además, se debe mencionar que existen costes asociados con los riesgos del proyecto, a saber, riesgos para la obtención de permisos, el suministro de energía, la construcción y la operación entre otros. La financiación del proyecto dependerá fuertemente de la clara identificación y cuantificación de dichos riesgos.

La tabla 2.7 consiste en una herramienta para calcular los tres costes mencionados a partir de los factores claves previamente descritos.

Tabla 2.7: Tabla Excel para el cálculo de costes a partir de los parámetros claves.

<i>Consumo energético (kWh/m³)</i>					1,07
TDS (mg/L)	Temperatura media (°C)	Exigencia de contenido de boro en el producto			
33500	24	< 1 mg/L			
<i>Coste del recurso energético (€/kWh)</i>					0,184
Red	Eólico	Solar FV	Solar térm.		
0,184	0	0	0		
<i>Coste de operación y mantenimiento (€/año)</i>					4678234
Energía	Químicos	Filtros	Eliminación residuos	<i>Subtotal Variables (euro/m³)</i>	
0,19688	0,0215	0,0376	0,016	0,27198	
Maniobra	Mantenimiento	Monitoring	O&M indirecto	<i>Subtotal Fijos (euro/m³)</i>	
0,0206	0,0232	0,00537	0,03488	0,08405	
<i>Coste capital (€)</i>					51874620
Construcción	Ing. Proyectos	Gestión proyectos	Financiación	Imprevistos	
31643518,2	5187462	4149970	5706208	5187462	
<i>Capacidad de la planta (m³/día)</i>					40000
<i>Factor de disponibilidad</i>					0,9
<i>Periodo de vida (años)</i>					20
<i>Coste del agua (€/m³)</i>					0,669

El valor del TDS es el indicado para el océano pacifico [22], la temperatura media del agua ha sido obtenida por los servicios de meteorología de Nueva Caledonia y el precio de la electricidad considerando una tarifa de uso industrial [4]. El coste del recurso en los demás casos se estudiará en el capítulo 4. El resto de los valores procede del ejemplo 2.2.1. Se adaptarán dichos valores a la planta concreta considerada en el capítulo 4.

3

Prediseño del núcleo productivo y cálculo del consumo energético

En este capítulo se prediseña el núcleo productivo de un sistema de ósmosis inversa adecuado a las características del agua de mar de Nueva Caledonia. Se usará el programa ROSA versión 9.1, desarrollado por Filmtec. Además, se calculará el consumo energético específico para cada uno de los diseños.

3.1. Datos de entrada: características del agua de mar

Temperatura. Como se ha señalado en el capítulo anterior (apartado 2.2.4, tabla 2.7), la temperatura media del agua del mar es 24°C. Sin embargo, se trata de un valor medio para todo el conjunto del archipiélago. Una base de datos, puesta a disposición por el Grand Observatoire de l'Environnement et de la biodiversité terrestre et marine du Pacifique Sud [23], dispone de una serie de medidas de temperaturas en sitios concretos. Por ejemplo la estación de Bourail-Poé proporciona la evolución de las temperaturas en dicho lugar entre diciembre de 1999 y enero de 2009. Consta en una serie de 76390 valores, a saber una muestra cada hora salvo durante el periodo del 11/03/2003 hasta el 01/12/2003 (periodo de inactividad), durante 9 años. El fichero Excel es descargable, sin embargo no se puede explotar, por lo cual a partir de la figura 3.1 se saca el valor medio.

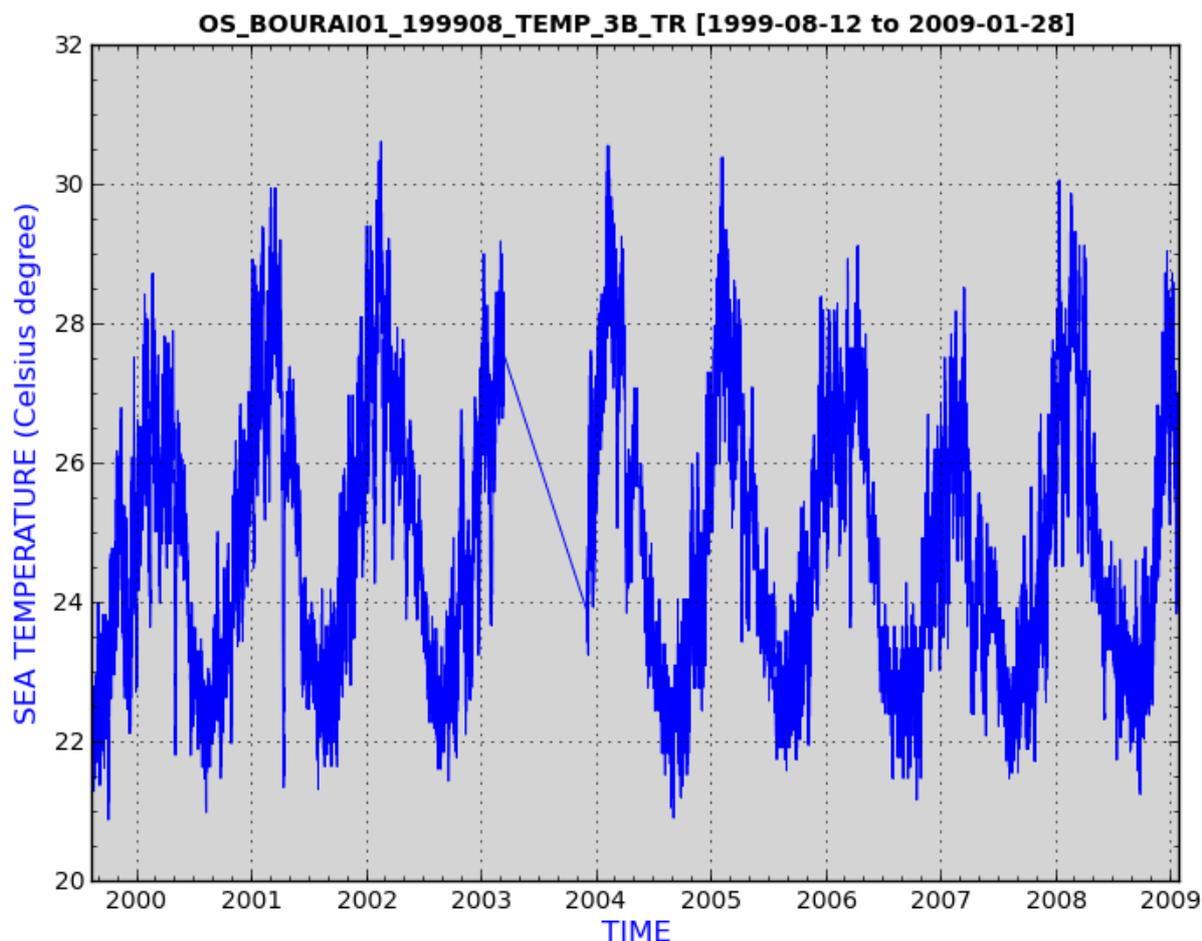


Figure 3.1: Evolución de la temperatura del agua de mar en Poé, Bourail

La temperatura máxima media es de 29.6°C y la temperatura mínima media es de 21.3°C, por lo cual la temperatura media del agua de mar es de 25.45°C. Se considera este valor de entrada para el diseño.

pH. Según el Observatoire de l'Environnement, debido a la acidificación de los océanos, el valor del pH ha pasado de 8.2 a 8.1.

Composición del agua de mar. Desafortunadamente, los niveles de concentración de cada constituyente no se encuentran disponibles para Nueva Caledonia. Por lo tanto, se consideran los valores correspondientes al océano pacífico, encontrados en el apéndice A del libro 'The Guidebook to Membrane Desalination Technology', Mark Wilf [22].

Tabla 3.1: Composición del agua de mar del océano pacífico.

Componente	Ca	Mg	Na	K	CO3	HCO3	SO4	Cl	B	TDS
Ppm	440	1300	10200	380	2.0	170	3000	18500	4.5	34000

Se nota que el pH proporcionado en este apéndice, de 8.0, difiere del valor de 8.1 considerado, por lo cual aparece una ligera diferencia en la composición del agua de alimentación ajustada en el programa ROSA.

The screenshot shows the ROSA Control Panel interface for NC10HID. It displays system parameters and a detailed table of ion composition. The system permeate flow is 83.33 m³/h, feed flow is 185.18 m³/h, and recovery is 45.00%. The water type is 'Seawater with Generic membrane filtration, SDI < 3'. Feed percentage is 100.0%, feed number is 1, and feed streams are 1. The system temperature is 25.5 °C and pH is 8.10. A note indicates that changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations.

Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH4+ + NH3)	0	0.000	0.000	0.00
Potassium (K)	381.888	488.322	9.766	381.89
Sodium (Na)	10250.78	22294.000	445.880	10250.78
Magnesium (Mg)	1306.47	5373.766	107.475	1306.47
Calcium (Ca)	442.19	1103.269	22.065	442.19
Strontium (Sr)	0	0.000	0.000	0.00
Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonate (CO3)	27.486	45.803	0.916	27.49
Bicarbonate (HCO3)	169.162	138.646	2.773	169.16
Nitrate (NO3)	0	0.000	0.000	0.00
Chloride (Cl)	18408.79	25962.250	519.245	18408.79
Fluoride (F)	0	0.000	0.000	0.00
Sulfate (SO4)	2985.213	3109.597	62.192	2985.21
Silica (SiO2)	0	n.a.	n.a.	0.00
Boron (B)	4.518	n.a.	n.a.	n.a.

System Temp: 25.5 °C System pH: 8.10

Note: Any changes in raw feedwater composition will affect scaling calculations. Please review scaling calculations.

Ilustración 3.1: Composición ajustada del agua de entrada en el programa ROSA

3.2. Criterios de diseño y metodología

3.2.1. Hipótesis de partida

Capacidad de la planta. Se escoge una capacidad de planta de 2000 m³/día (83.33 m³/hora). Este valor podrá cambiar en el capítulo 4 para el diseño concreto de la planta de ósmosis inversa, con especificaciones sobre el consumo y los diferentes usos.

Flujo de permeado. Se intentará lograr una densidad de flujo de permeado medio o “flux” de 14 l/m²/h.

Conversión. Un valor habitual para la conversión o “recovery” (caudal volumétrico de producto/caudal volumétrico de alimentación) es de 45%.

Membranas. Para empezar se usa un solo tipo de membrana, la SW30HRLE 440i de Filmtec. En una segunda fase, se consideran otros tipos como la SW30XLE 440i y la SW30ULE 440i, combinando los distintos tipos en un mismo permeador.

3.2.2. Cálculo del número de tubos de presión necesarios

Se pretende lograr un flujo de permeado (FL) de 14 l/m²/h. Se conoce el área activa (AA) de la membrana. En el caso de la SWHRLE 440i el área es 40.9 m². Se supone un número de elementos de membrana (EM) de 7 en cada tubo de presión o permeador. Conocida la capacidad de la planta (CP), es decir, la productividad o flujo de permeado total, se deduce el número de permeadores (PM) necesarios con la relación (2).

$$PM = \frac{CP (m^3/d)}{FL (l/m^2/h) \cdot 24 (h/d) \cdot 10^{-3}(m^3/l) \cdot EM \cdot AA (m^2)} \quad (2)$$

El resultado es 20.79. Por lo cual, hace falta elegir un número entero para los permeadores necesarios. Con PM = 21 tubos de presión, son 147 elementos en total, se logra una densidad de flujo de permeado de 13.87 l/m²/h (error relativo de 0.93%). Con PM = 20 permeadores, la densidad de flujo tiene un valor de 14.56 l/m²/h (error relativo de 4%). Por lo tanto, se elige el valor de 21 tubos de presión.

3.2.3. Criterios de elección del diseño

En el apartado anterior se ha presentado como obtener un diseño. Se puede obtener más diseños, para compararlos, variando por ejemplo:

El número de elementos de membrana por cada tanque de presión. En el ejemplo anterior se ha elegido 7 pero se pueden colocar 8 elementos por permeador.

El número de tubos de presión. Dado que del cálculo se obtiene un valor no entero, se tiene la elección entre dos valores enteros. En el caso anterior se podría elegir 20 permeadores en vez de 21, aunque se alejaría de una densidad de flujo de permeado de 14 l/m²/h. Posteriormente se verá en qué influye esa diferencia.

El tipo de membrana. Se dispone de varias membranas, de Filmtec, a saber las SW30HLE 440i, SW30XLE 440i y SW30ULE 440i.

La configuración. Se puede combinar elementos de diferentes tipos, lo cual se denomina diseño híbrido inter-etapas.

La comparación entre las diferentes pruebas se basará en los siguientes criterios:

El consumo energético específico. Se trata del criterio principal para clasificar los diseños, ya que la parte de costes asociada al consumo de energía alcanza unos 30% de los costes totales (capítulo 2, apartado 2.2.4).

La calidad del agua producto. Obviamente la concentración en sales (TDS) del permeado debe cumplir con los estándares establecidos localmente y el contenido de boro debe mantenerse por debajo de las recomendaciones de la OMS (2.4 mg/L desde 2011).

La distribución del flujo de permeado a lo largo de los elementos de un permeador. Sobre todo el valor del flux en el primer elemento, para evitar el efecto de ensuciamiento excesivo.

3.3. Comparación de diseños

3.3.1. Configuración estándar

En una primera fase sólo se usa un tipo de membrana, a saber la SW30HRLE 440i. El cálculo de número de tanques correspondiente está presentado en el apartado 3.2.2. Se trata de una configuración de un paso con una etapa. Se va a comparar los 4 diseños siguientes:

Tabla 3.2: Características de los distintos diseños de configuración simple.

Diseño	Nº de elementos	Nº de permeadores	Flux del permeado (l/m ² /h)
1	7	21	13.87
2	8	18	14.16
3	7	20	14.56
4	8	19	13.41

Los resultados para cada uno de los diseños se presentan en la tabla 3.3. Una correlación aparece entre la calidad del producto y el consumo específico. A mayor calidad (menor TDS), mayor consumo energético. Es relevante mencionar que también cambia el número total de elementos en cada diseño y el consumo energético crece de manera casi lineal al disminuir el número total de elementos (aumenta por lo tanto la densidad de flujo) como se puede apreciar en la figura 3.2.

Tabla 3.3: Consumo energético, calidad del producto y concentración de boro para cada uno de los diseños convencionales. Condiciones de operación: conversión (45%) y productividad (8.33 m³/h) constantes.

Diseño	Consumo específico (kWh/m ³)	TDS (mg/L)	Concentración de boro (mg/L)
1	3,98	179,9	0,91
2	4,01	174,9	0,9
3	4,04	170,82	0,88
4	3,95	184,58	0,93

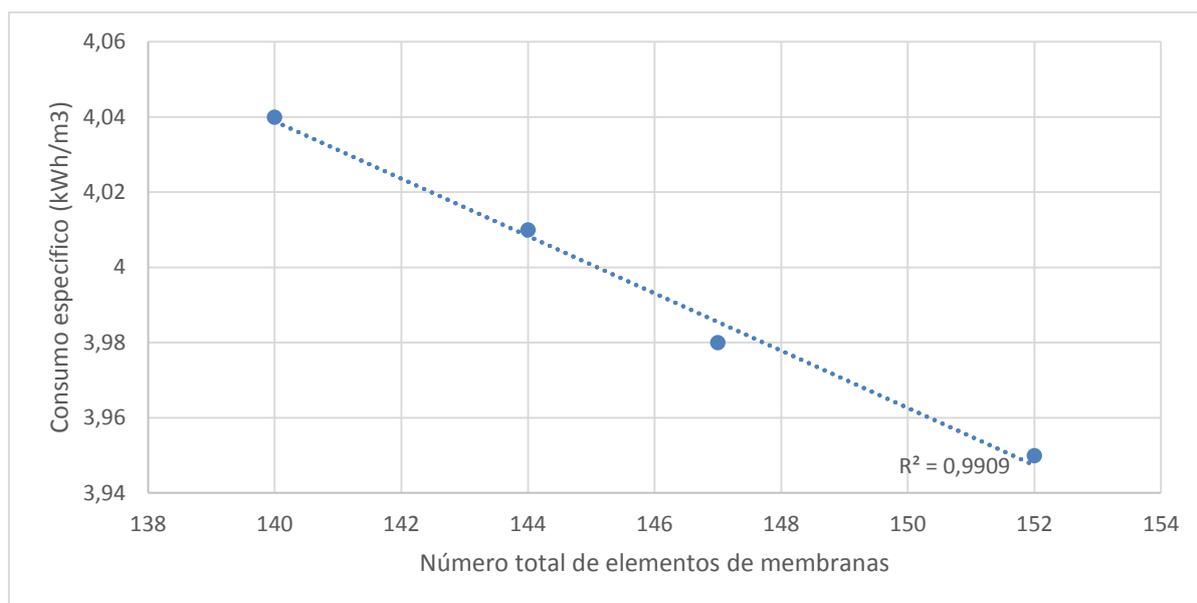


Figure 3.2: Evolución del consumo específico en función del número total de elementos.

Resulta que desde un punto de vista energético, interesa bajar la densidad de flujo de permeado aumentado el número total de elementos. Añadir elementos supone un sobre coste adicional por lo cual no se puede bajar indefinidamente la densidad de flujo. Un valor comúnmente aceptado es $14 \text{ l/m}^2/\text{h}$. De los cuatro diseños probados, el que presenta una densidad de flujo más cercana a dicho valor de 14 es el diseño 1. Además es el segundo en cuanto a menor consumo energético específico. Todos los diseños proporcionan un permeado de alta calidad, cumpliendo con los requisitos.

3.3.2. Configuración híbrida inter-etapa

Las membranas de última generación proporcionan tasas de rechazo de sal altas mientras consumen menos energía. El uso de dichas membranas lleva a una reducción de los costes asociados al consumo energético [24]. Sin embargo, al aumentar la densidad de flujo de permeado o "flux", también se acentúa el desequilibrio de dicho flux entre el elemento de entrada o de cabeza y el elemento de salida o de cola. Tener elementos de alta densidad de flujo de permeado al principio favorece el ensuciamiento y las incrustaciones, es decir acentúa el fenómeno de fouling. Una manera de evitar superar el flujo crítico (flux a partir del cual el fenómeno de fouling es severo [25]) sería aplicar una resistencia (presión opuesta) en el lado de permeado pero es contra-productivo ya que supone un aumento en la presión de alimentación. Una forma alternativa de reducir dicho desequilibrio de flujo de permeado entre entrada y salida de un elemento es lo que se denomina diseño híbrido inter-etapas. Consiste en el uso de membranas de tipos distintos en un mismo tubo de presión, o permeador. Con el fin de reducir el desequilibrio, se colocan elementos de bajo flujo en posición de cabecera seguidos por elementos de alto flujo. Dicho concepto de diseño fue probado con patente por la compañía *Dow Water Solutions Company* y conocido como Internally Staged Design [26,27]. Usando una configuración que combina 3 tipos de membranas con flujos de 7500, 9000 y 12000 gdp, *Dow* demostró que plantas de desalación de mar de ósmosis inversa podían aumentar la conversión (recovery) sin

sobrepasar los límites de presión o incrementar el riesgo de incrustaciones debido a un flujo de permeado alto en el primer elemento. Existen pocas publicaciones científicas sobre el tema de diseño híbrido inter-etapas. Sin embargo, plantas ya en operación proporcionan información acerca del tema, en condiciones de operación específicas. Los 3 siguientes casos son ejemplos relevantes:

1. Planta de desalación de ósmosis inversa de El Colosso en Chile. Tiene una capacidad de 45630 m³/día. De hecho, resulta ser la planta más importante en Suramérica, en operación desde julio 2006. Opera a una conversión alta de 50%. Consta de 4 trenes de ósmosis inversa, cada tren incluye 137 tubos de presión o permeadores. Se encuentran 7 elementos de membrana en cada permeador. Los dos primeros elementos son de alta tasa de rechazo y los cinco siguientes son de alto flujo. Resulta que el diseño permite obtener un reparto de flujo de permeado a lo largo de los elementos equilibrado y una buena calidad de producto, sin afectar a la presión de alimentación [28,29].
2. Planta de desalación de ósmosis inversa Mazarrón, ubicada en Murcia, España. Tiene una capacidad de 35000 m³/día. Fue construida en 1995 y comisionada en 2001. Similarmente a la planta *El Colosso*, tiene dos elementos de membranas de alta tasa de rechazo seguidos por cinco elementos de membrana de tasa de rechazo estándar, es decir de alto flujo [29].
3. Planta de desalación de ósmosis inversa Las Palmas III, Las Palmas de Gran Canaria (España). En 2002, se incrementó el número de permeadores en la segunda etapa de 68. Permitió mejorar la distribución de flujo y reducir el efecto de incrustaciones. En 2003, se reemplazaron las membranas de dos trenes de ósmosis inversa por nuevos elementos SWC1. En 2005, se sustituyeron las segundas etapas de dos trenes con nuevos elementos SWC3+. La primera etapa del tren F adoptó una configuración híbrida con dos elementos SWC1 seguidos por cuatro SWC3+s [30].

Existen dos enfoques para analizar los beneficios aportados por una configuración híbrida inter-etapa:

1. Tasa de conversión y producción constantes. El beneficio consiste en reducir el consumo energético mientras la capacidad de la planta sigue siendo la misma.
2. Flujo y presión de alimentación constantes. El beneficio se mide en el aumento de la capacidad de la planta por reducir el consumo energético específico mientras se mantiene el consumo energético total de la planta.

Resulta que salvo en el caso de las membranas desarrolladas por Filmtec, no existen análisis cuantitativos en la literatura científica. En la parte siguiente, se comparan diseños híbridos inter-etapas con el diseño estándar previamente presentado en el apartado 3.3.1 (diseño 1).

3.3.3. Análisis diseño híbrido: conversión y productividad constantes

El análisis desarrollado a continuación se basa en el enfoque 1, a saber, considerando la tasa de conversión y producción constantes. Se consideran ahora tres tipos de membrana, cuyas características se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Características de las tres membranas de Filmtec comparadas.

Tipo de membrana	Flujo de permeado (m ³ /d)	Área activa (m ²)	Tasa de rechazo de sales (%)
SW30HRLE-440i	31.0	40.9	99.80
SW30XLE-440i	37.5	40.9	99.80
SW30ULE-440i	45.4	40.9	99.70

Las condiciones de operación son una conversión de 45% y una productividad de 83.33 m³/h.

En consecuencia, de los resultados proporcionados por las distintas plantas presentadas en el apartado anterior, se deduce que, con el fin de equilibrar la repartición de flujos a lo largo de un permeador, conviene colocar los elementos en el siguiente orden:

- Posición delantera: SW30HRLE-440i ya que es la de flujo más bajo (A)
- Posición media: SW30XLE-440i por tener un flujo más alto pero menor que la siguiente (B)
- Posición trasera: SW30ULE-440i ya que tiene el flujo de permeado más alto (C)

Se ponen a prueba diseños de cuatro tipos:

Diseño 1. Únicamente A, 7 SW30HRLE 440i

Diseño 5. Secuencia A-C, 2 SW30HRLE 440i + 5 SW30ULE 440i

Diseño 6. Secuencia A-B, 2 SW30HRLE 440i + 5 SW30XLE 440i

Diseño 7. Secuencia A-B-C, 1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i

Nótese que para que sean comparables, todos consisten en permeadores de 7 elementos, consiguiendo un flujo de permeado medio de 13.87 l/m²/h. La figura 3.4 proporciona la distribución de flujo de permeado para cada diseño.

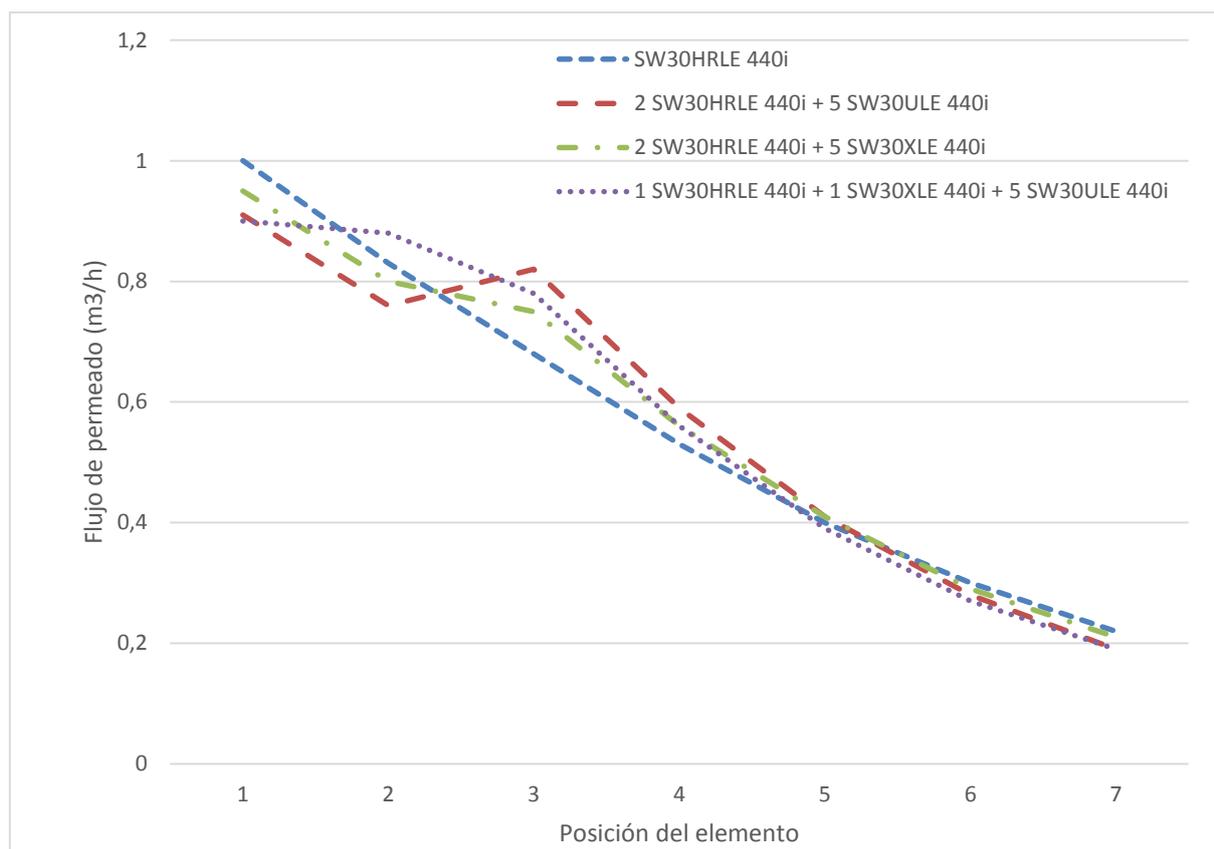


Figure 3.3: Distribución del flujo de permeado en distintos diseños basados en membranas de Filmtec. Condiciones de operación: conversión (45%) y productividad (83.33 m³/h) constantes y un flujo de permeado medio de 13.87 l/m²/h.

La primera observación es que el diseño estándar presenta el flujo de permeado mayor en el primer elemento (1 m³/h) mientras todos los diseños híbridos presentan flujos menores de 1 m³/h (0.95 - 0.90 m³/h). Además, resulta ser el diseño con mayor consumo específico (Fig. 3.6). Por otra parte, dentro de la configuración con dos tipos de membrana (diseños 5 y 6), destaca una reducción mayor del flujo en el primer elemento con el uso de membranas de ultra baja energía (o de alto flujo de permeado) SW30ULE 440i colocados en posición final sobre el uso de la SW30XLE 440i (0.91 m³/h frente a 0.95 m³/h). Además, el diseño 5 tiene un consumo energético específico mucho menor frente al consumo específico en el caso del diseño 6 (Fig. 3.6). El diseño híbrido 7 presenta el menor flujo de permeado en el primer elemento, lo cual confirma la ventaja de colocar los elementos de membrana en la secuencia A - B - C. Por otra parte es el diseño de menor consumo específico (3.72 kWh/m³). Por lo tanto, conviene investigar si existe una configuración del tipo A - B - C que mejora aún más el efecto deseado (menor flujo en el primer elemento combinado con una mejor distribución de flujo para evitar ensuciamiento). A continuación, se compara el diseño 7 con las tres configuraciones siguientes:

Diseño 8. 2 SW30HRLE 440i + 2 SW30XLE 440i + 3 SW30ULE 440i

Diseño 9. 1 SW30HRLE 440i + 4 SW30XLE 440i + 2 SW30ULE 440i

Diseño 10. 2 SW30HRLE 440i + 3 SW30XLE 440i + 2 SW30ULE 440i

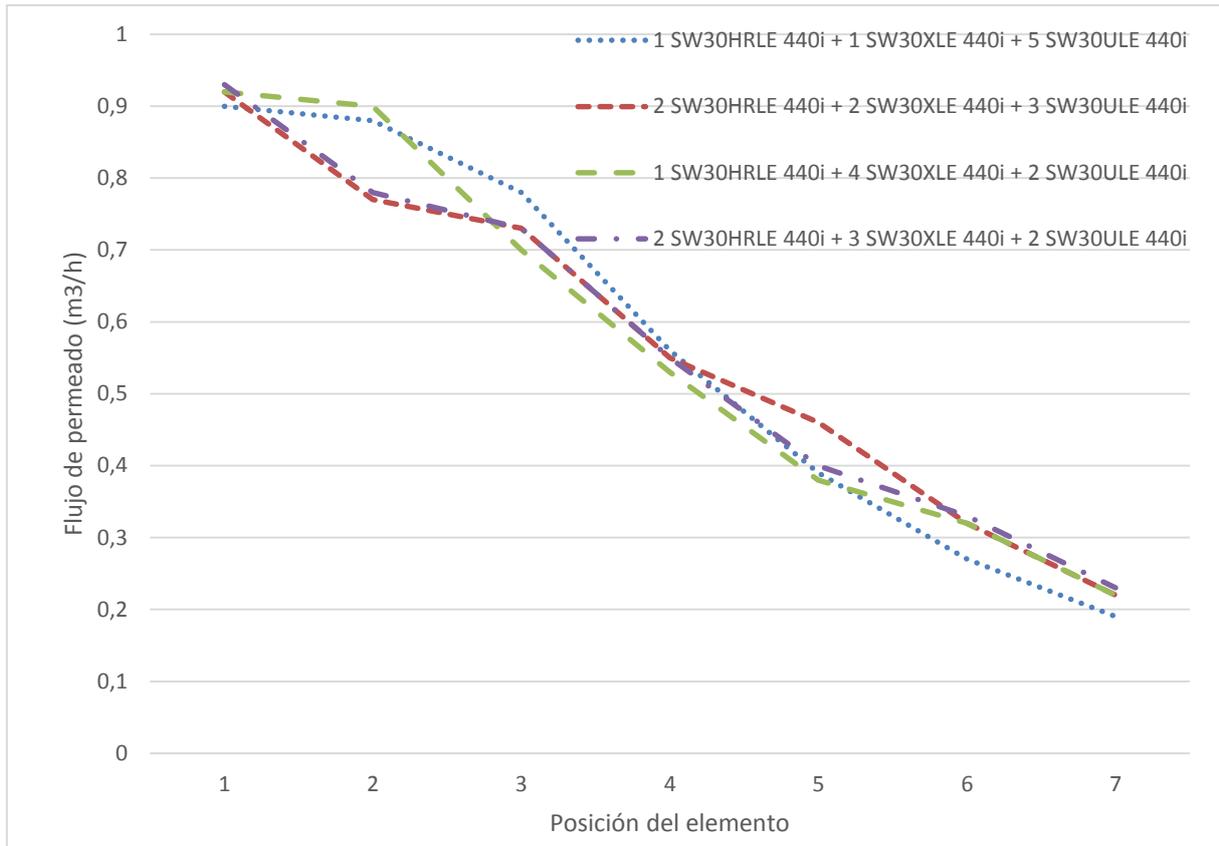


Figure 3.4: Distribución del flujo de permeado en distintos diseños híbridos. Condiciones de operación: conversión (45%) y productividad (83.33 m³/h) constantes y un flujo de permeado medio de 13.87 l/m²/h.

La figura 3.5 proporciona la distribución de flujo para los nuevos diseños probados frente a la del diseño 7. Se nota que el diseño 7 sigue siendo el más interesante desde el punto de vista de ensuciamiento o incrustaciones ya que ofrece:

- Menor flujo de permeado en el primer elemento,
- Mejor distribución del flujo a lo largo de un permeador.

Por otro lado, los diseños 8, 9 y 10 presentan un consumo específico mayor que el del diseño 7 (Fig. 3.6). Se debe a la reducción de elementos de ultra baja energía, por lo cual se requiere mayor energía para producir la misma cantidad de agua. Sin embargo, la calidad del agua producida sí resulta ser mayor en dichos diseños (Fig. 3.7), lo cual se debe a un número mayor de elementos de alta tasa de rechazo de sal.

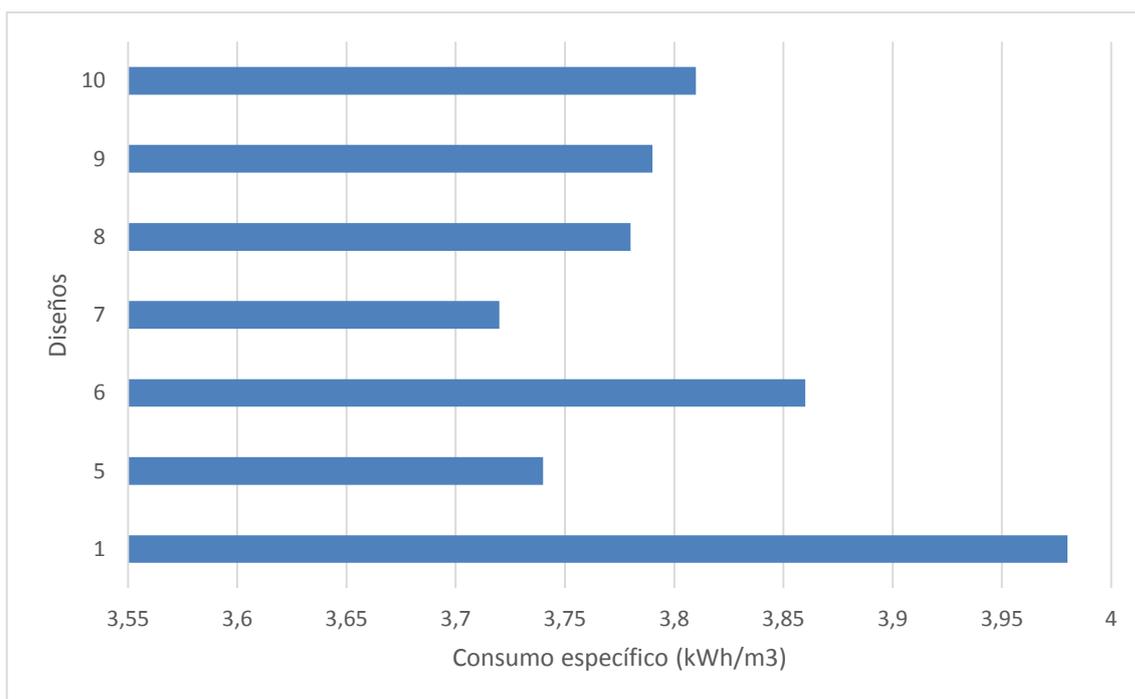


Figure 3.5: Consumo energético específico en los distintos diseños, con tasa de conversión de 45%, productividad de 83.33 m³/h y flujo medio de permeado de 13.87 l/m²/h.

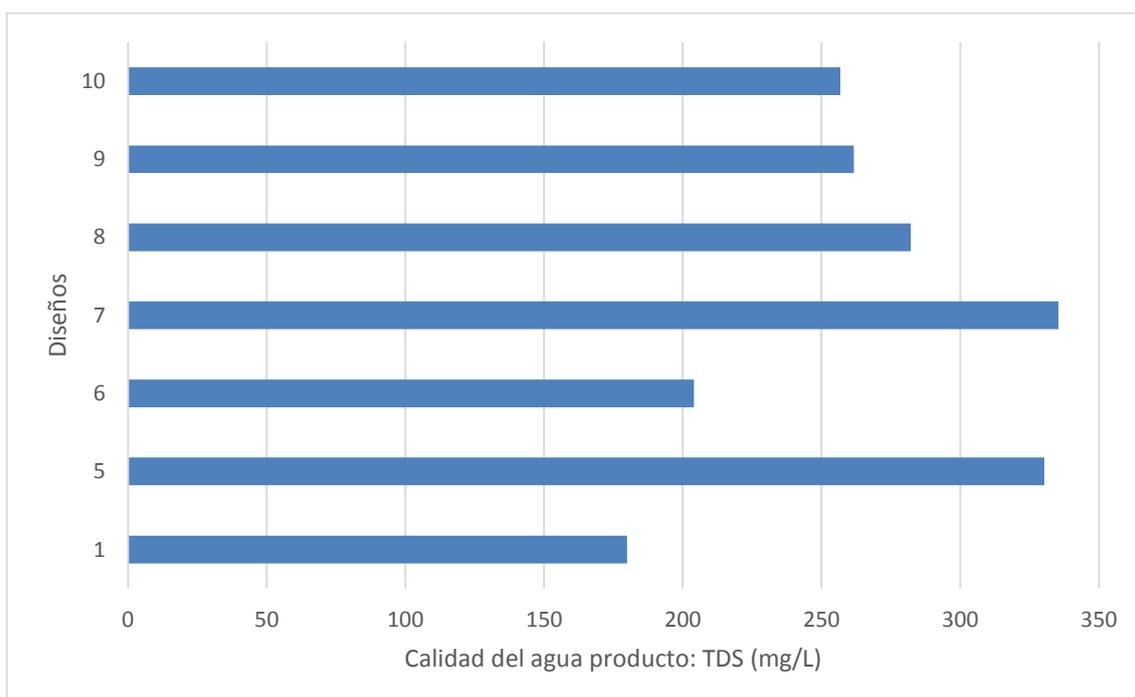


Figure 3.6: Calidad del agua producida en los distintos diseños, con tasa de conversión de 45%, productividad de 83.33 m³/h y flujo medio de permeado de 13.87 l/m²/h.

Aunque los diseños 5 y 7 presentan los valores más altos de TDS (menor calidad de agua al colocar elementos de alta tasa de rechazo de sal únicamente en las posiciones delanteras), la calidad del agua sigue cumpliendo con las recomendaciones de la OMS (TDS < 600 mg/L [31]). Nótese que, en la edición del 2004, el valor límite recomendado para el boro es de 0.5 mg/L, valor revisado a 2.4 mg/L en la cuarta edición de 2011.

Tomando este último valor por referencia, se nota que todos los diseños cumplen con dicho límite (tablas 3.3 y 3.5).

Tabla 3.5: Contenido de boro en el permeado para los distintos diseños. Condiciones de operación: conversión de 45%, productividad de 83.33 m³/h y flujo medio de permeado de 13.87 l/m²/h.

Diseño	1	5	6	7	8	9	10
Boro (mg/L)	0,91	1.31	1.02	1.32	1.18	1.14	1.13

Sin embargo, si se considera estrictamente el valor límite para la UE (1 mg/L), resulta que únicamente los diseños estándares (1, 2, 3 y 4) consiguen respetar el límite de contenido de boro. Existen pocos estudios cuantitativos sobre el efecto de boro sobre la salud, por lo que los valores límites o recomendaciones evolucionan con el tiempo y la zona (por ejemplo: Israel es más restrictivo por el tema de agricultura de verduras muy sensibles al boro). En nuestro caso, no se trata de una zona de carácter sensible, por lo cual, quedarse con la recomendación de la OMS parece lo correcto.

Las figuras 3.4 – 3.7 cuantifican las ventajas de un diseño híbrido inter-etapa adecuado, tal como el 5 o el 7, en comparación con un diseño convencional (1 – 4).

3.3.4. Análisis diseño híbrido: caudal y presión de alimentación constantes

El análisis desarrollado a continuación se basa en el enfoque 2, a saber un flujo y una presión de alimentación constantes. Es lo mismo que decir que se considera el consumo energético total de la planta constante. Las variables son, entonces, el flujo de permeado, o producción, y la tasa de conversión. Las condiciones de operación para todas las simulaciones son un caudal de alimentación de 185.18 m³/h y una presión de alimentación de 51.57 bar. Según el análisis establecido en el apartado 3.3.4, se seleccionan los mejores diseños, es decir los dos diseños híbridos inter-etapas (diseño 5, 2 SW30HLRE 440i + 5 SW30ULE 440i, y diseño 7, 1 SW30HLRE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i) para la comparación con el diseño estándar (diseño 1, 7 SW30HLRE 440i). La figura 3.8 proporciona la distribución de flujo de permeado a lo largo de los 7 elementos del permeador.

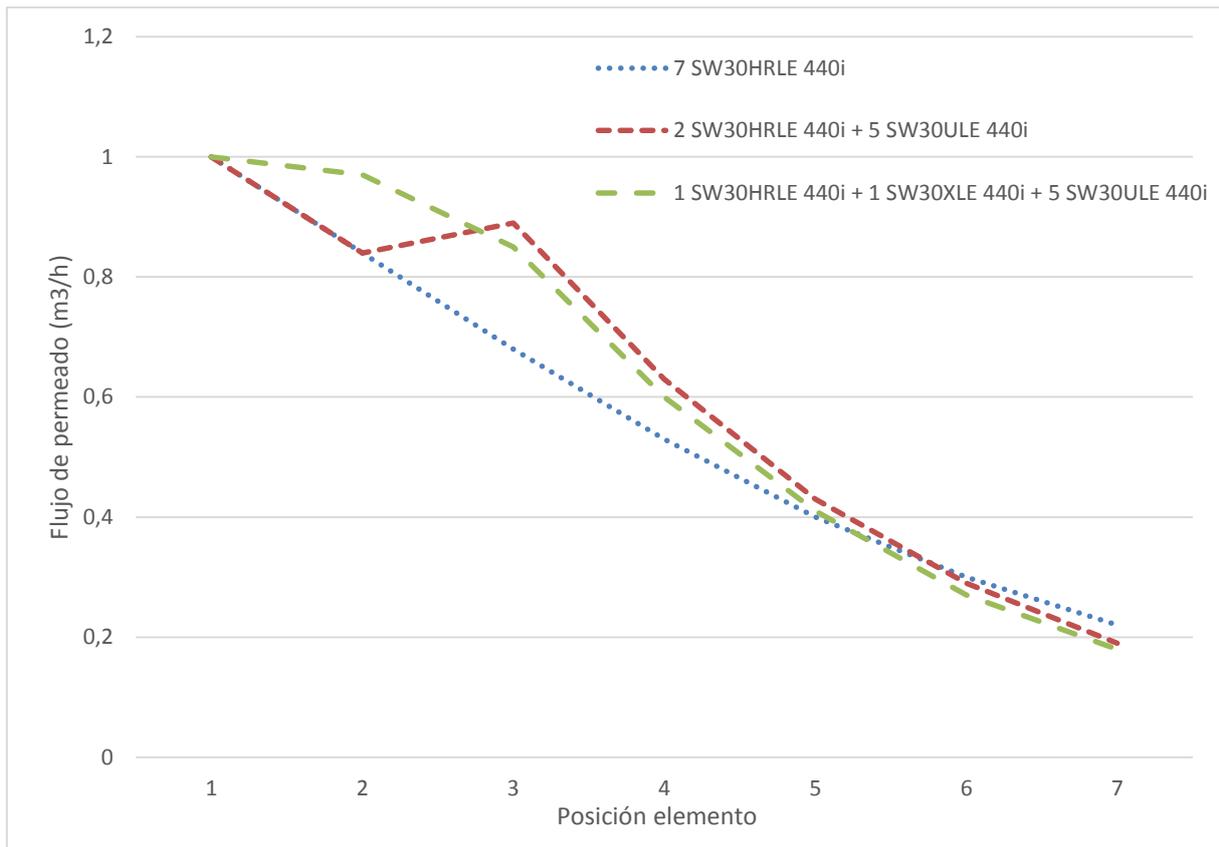


Figure 3.7: Distribución de flujo de permeado a lo largo de un tanque de presión en distintos diseños. Condiciones de operación: caudal de alimentación 185.18 m³/h y presión de alimentación de 51.57 bar constantes.

Se nota que, entre el tercer y el quinto elemento, la producción aumenta significativamente con los diseños híbridos en comparación con el diseño convencional. En los primeros elementos, se mantienen iguales la productividad y la conversión. Sin embargo, el diseño híbrido con configuración A - B - C ofrece una producción mayor en el segundo elemento. Las figuras 3.9 - 3.10 muestran el caudal total de producto y la tasa de conversión para los diseños seleccionados.

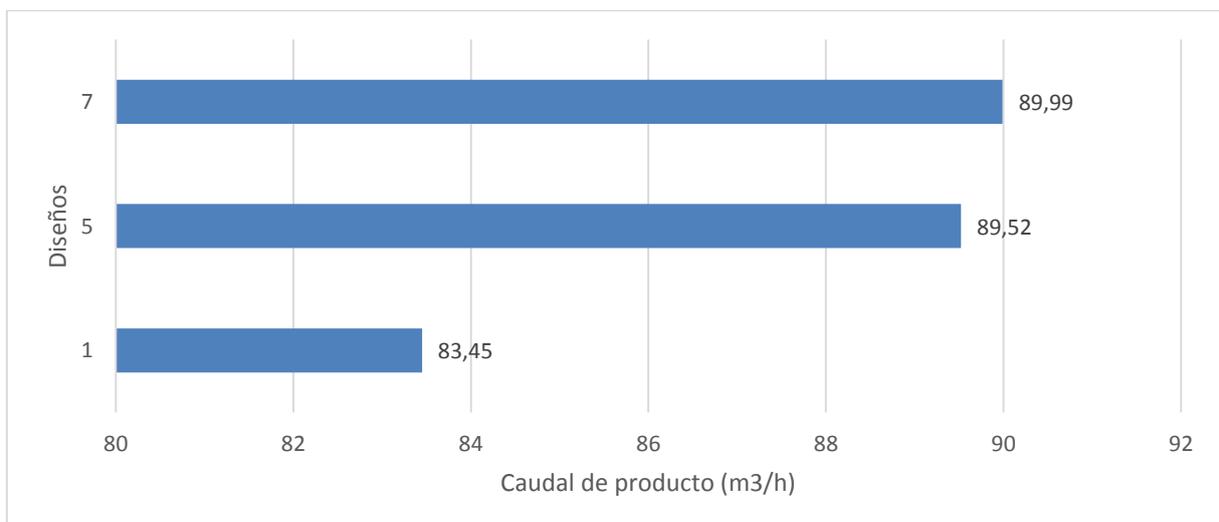


Figure 3.8: Flujo de producto con distintos diseños. Condiciones de operación: caudal de alimentación 185.18 m³/h y presión de alimentación 51.57 bar constantes.

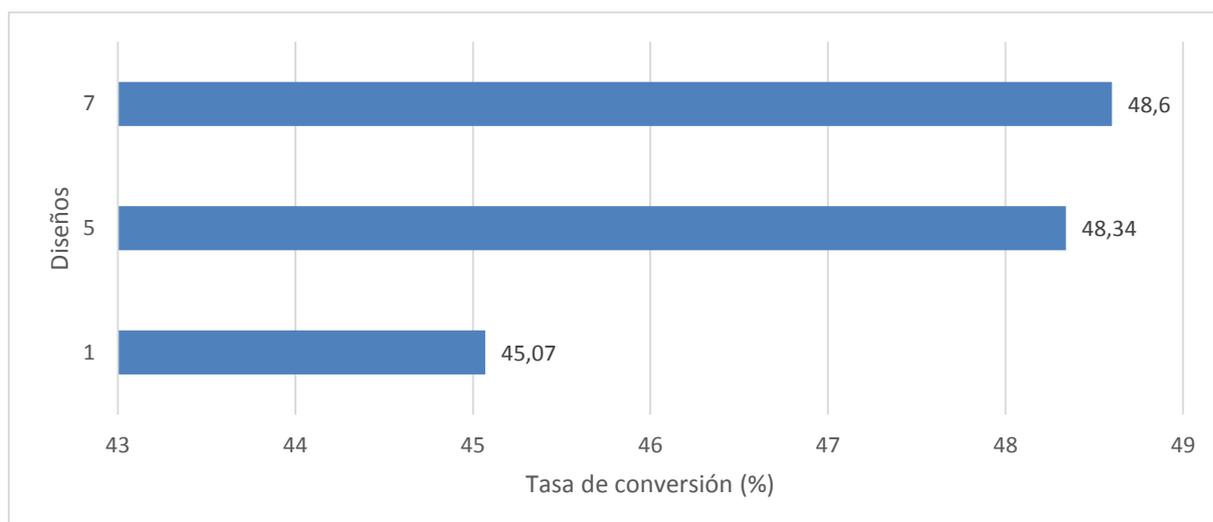


Figure 3.9: Conversión con distintos diseños. Condiciones de operación: caudal de alimentación 185.18 m³/h y presión de alimentación 51.57 bar constantes.

El uso de membranas de alta productividad, o de baja presión, aumenta la conversión hasta un 8 % en comparación con un diseño convencional. Además, permite lograr una producción mayor por elemento.

Se concluye de los apartados 3.3.4 y 3.3.5 que dos diseños híbridos (2 SW30HRLE 440i + 5 SW30ULE 440i y 1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i) ofrecen una mejor distribución de flujo de permeado dentro de un permeador, junto con una mayor producción a costes energéticos reducidos en comparación con un diseño estándar (7 SW30HRLE 440i). Dichas mejoras influyen directamente sobre el coste capital y los costes de operación, disminuyéndolos y permitiendo un sistema de pre-tratamiento más sencillo. Según el estudio realizado, el diseño 7 (1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i) presenta una ligera ventaja sobre el 5.

3.4. Sistema de recuperación de energía

La comparación establecida anteriormente no toma en cuenta el posible ahorro energético por el uso de un sistema de recuperación de energía. A continuación se calcula el ahorro energético conseguido por un sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión (IP), aprovechando la energía del concentrado que sale a presión elevada.

3.4.1. Cálculo del ahorro energético

Se supone lo siguiente:

- Rendimiento del IP: 97%.
- Caudal bombeado por la bomba booster (baja presión) igual al caudal de concentrado: $Q_{bp}=Q_{bd}$.

- Presión del concentrado a la salida de IP de 2 bar.

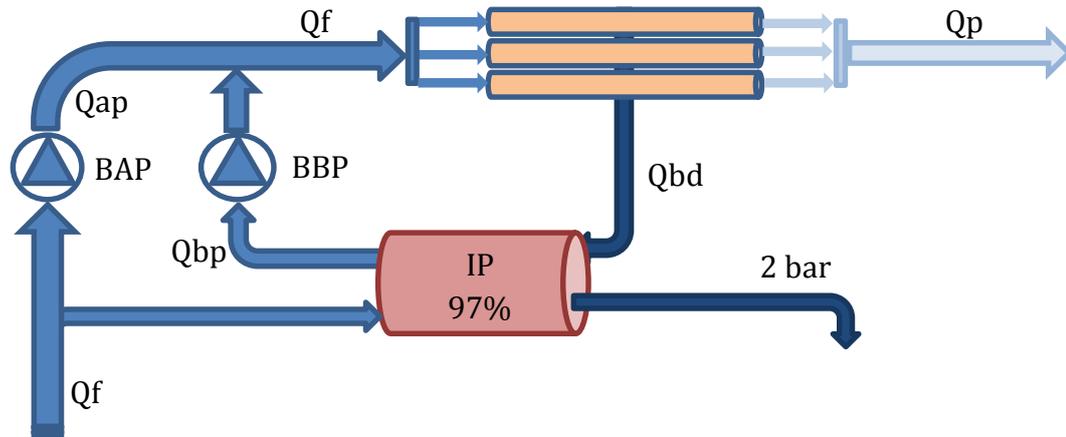


Figure 3.10: Configuración con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión.

La potencia llevada por el concentrado, en W, se calcula según la expresión (3):

$$\text{Potencia (W)} = Qbd \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot (\Delta h_{T_{cst}}) \left(\frac{J}{kg} \right) \quad (3)$$

Usando el coeficiente de dilatación cúbica $\alpha(T) = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$ y el rendimiento del IP, se deduce que:

$$\text{Ahorro energético (W)} = 0.97 \cdot Qbd \left(\frac{m^3}{s} \right) \cdot (1 - \alpha(T) \cdot T) \cdot (Pbd - 2 \cdot 10^5) (Pa) \quad (4)$$

El coeficiente de dilatación cúbica depende de la temperatura. Se disponen de dos valores por lo cual interpolando se deduce α para 25.5°C.

Tabla 3.6: Coeficiente de dilatación cúbica en función de la temperatura.

T (K)	293	303	298.5
Alpha (K ⁻¹)	2.476x10 ⁻⁴	3.266x10 ⁻⁴	2.911x10 ⁻⁴

Según se fijan la conversión y la producción (análisis 1), o el flujo de entrada y presión de alimentación (análisis 2), cambiará, o la presión del concentrado (Pbd), o el caudal de concentrado (Qbd), respectivamente.

3.4.2. Conversión y producción constantes

Se consideran una tasa de conversión de 45% y una producción de 83.33 m³/h. En la tabla 3.7 se dan los valores del ahorro energético para cada uno de los diseños. Dividiéndolo por la productividad, se deduce el ahorro específico (kWh/m³). Restando dicho valor al consumo energético específico sin recuperación de energía, se obtiene entonces el nuevo consumo energético específico (Fig. 3.11).

Tabla 3.7: Ahorro energético para cada uno de los diseños. Condiciones de operación: conversión 45% y productividad 83.33 m³/h constantes.

Diseño	Qbd (m ³ /h)	Pbd (bar)	Ahorro (kW)	Ahorro específico (kW/m ³)	Ahorro relativo (%)
1	101.85	50.04	120.38	1.44	36.30
5	101.85	46.96	112.66	1.35	36.15
7	101.85	46.74	112.11	1.34	36.17

La producción se ha mantenido constante y la conversión también, por lo cual debe salir la misma cantidad de concentrado para todos los diseños, por lo que Qdb no cambia. Sin embargo, al usar membranas de alto flujo, es decir de baja presión, el concentrado sale a una presión menor que en el caso del diseño estándar. Resulta que en comparación con la situación inicial, el diseño estándar consigue la mejor recuperación de energía (ligera diferencia).

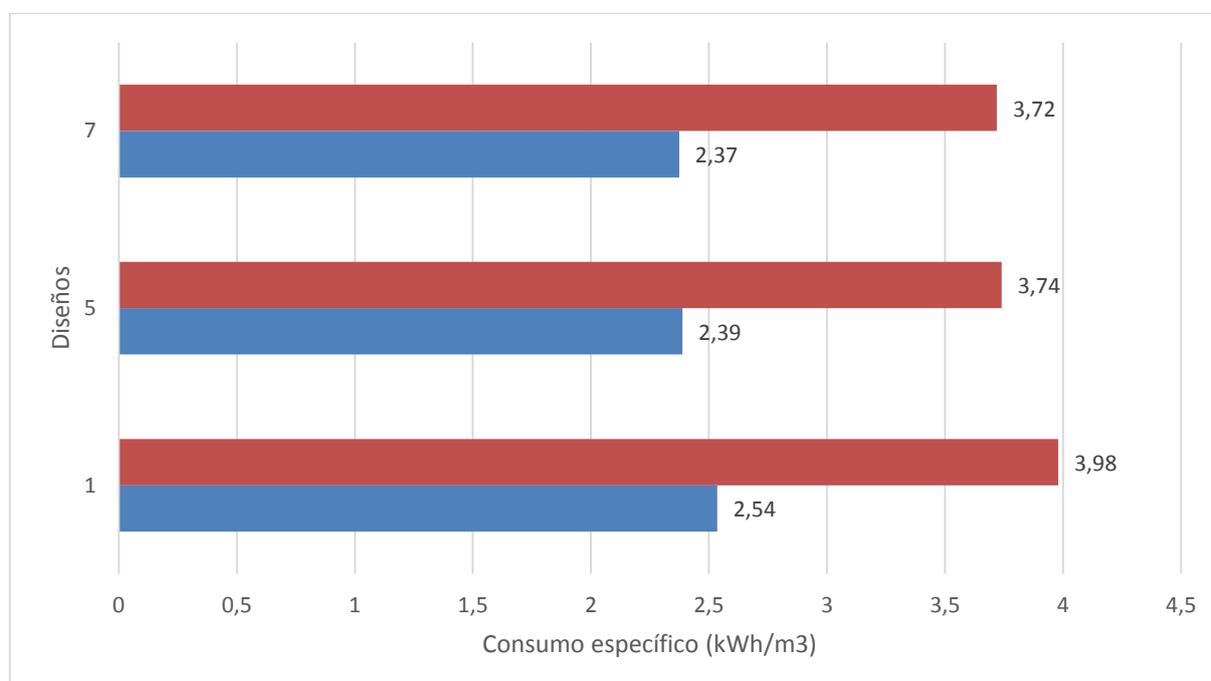


Figure 3.11: Consumo energético específico sin y con recuperación de energía en cada uno de los diseños. Condiciones de operación: conversión 45% y producción 83.33 m³/h constantes.

Aunque el diseño 1 proporciona la mayor reducción con respecto al consumo específico inicial (36.30%), tratándose de un ahorro relativo, los diseños híbridos siguen con consumo específico menor. El diseño 7 presenta todavía el menor consumo, ligeramente inferior al consumo específico del diseño 5.

3.4.3. Caudal y presión de alimentación constantes

Se consideran un flujo de entrada de 185.18 m³/h y una presión de alimentación de 51.57 bar. La tabla 3.8 proporciona el ahorro energético para cada uno de los diseños.

Cap. 3/Prediseño del Núcleo Productivo y Cálculo del Consumo Energético

Tabla 3.8: Ahorro energético para cada uno de los diseños. Condiciones de operación: caudal de alimentación 185.18 m³/h y presión de alimentación 51.57 bar constantes.

Diseño	Qbd (m ³ /h)	Pbd (bar)	Ahorro (kW)	Ahorro específico (kW/m ³)	Ahorro relativo (%)
1	101.73	50.04	120.24	1.44	36.30
5	95.66	50.08	113.16	1.26	34.16
7	95.19	50.1	112.65	1.25	33.92

Ahora la producción y la conversión cambian, por lo cual el caudal de concentrado Qdb también varía. Se ha mantenido constante el caudal de alimentación, por lo cual al usar membranas de alto flujo, Qdb disminuye (ya que la conversión aumenta como observado en la Fig. 3.9). Resulta que la presión de salida del concentrado Pbd es muy parecida en todos los casos, ya que se mantiene la presión de alimentación constante. Ahora sí se percibe notablemente una mejor recuperación de energía relativa con el diseño estándar. Se debe a que dicho diseño presenta el caudal de concentrado más alto, con una presión similar en todos los diseños. La figura 3.12 cuantifica la reducción del consumo energético específico en cada diseño al usar un sistema de recuperación de energía.

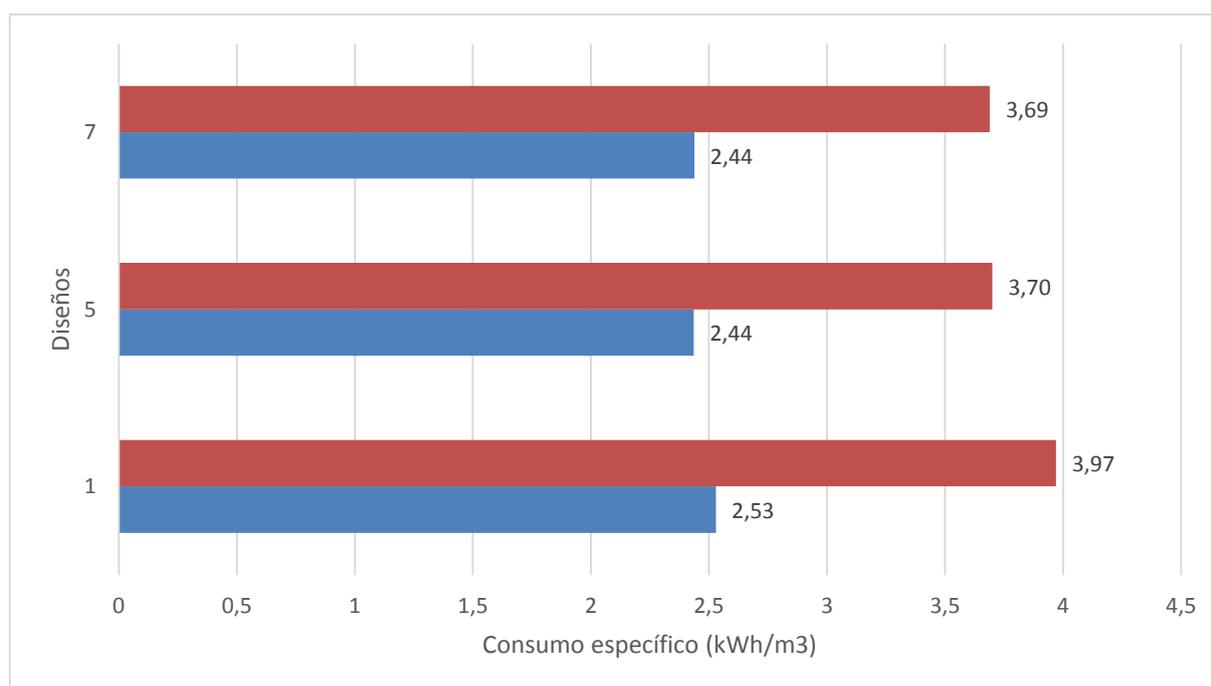


Figure 3.12: Consumo energético específico sin y con recuperación de energía en cada uno de los diseños. Condiciones de operación: caudal de alimentación 185.18 m³/h y presión de alimentación 51.57 bar constantes.

Los dos diseños híbridos presentan un nuevo consumo específico menor en comparación con el diseño estándar. El diseño 5 tiene un consumo específico ligeramente menor que el diseño 7, sin embargo la diferencia es mínima (2.436 kWh/m³ frente a 2.438 kWh/m³ para el diseño 7). Se debe a que la diferencia entre el ahorro energético entre ambos diseños compensa la diferencia entre los consumos específicos iniciales.

3.5. Conclusiones

El estudio previo permite sacar las conclusiones siguientes:

1. Los resultados obtenidos validan el criterio de una secuencia del tipo A – B – C con:
 - A. Elementos de alto rechazo en posiciones delanteras.
 - B. Elementos de alta productividad (baja energía) en posiciones intermedias-traseras.
 - C. Elementos de alta productividad y ultra baja energía en posiciones finales.
2. Un criterio sencillo de diseño sería: aplicar el criterio A para las posiciones delanteras y el criterio C para las 5 últimas posiciones. Resulta útil cuando se encuentra poca diferencia entre A y B en la segunda posición.
3. Se recomiendan los diseños híbridos específicos siguientes:
 - a. A – C: 2 SW30HRLE 440i + 5 SW30ULE 440i
 - b. A – B – C: 1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i

Se ha demostrado también que el uso de las membranas de baja energía (SW30XLE 440i) y de ultra baja energía (SW30ULE 440i) lleva a una reducción del consumo energético para producir una misma cantidad de agua pero al tener un flujo de permeado alto se penaliza la calidad del agua. Sin embargo, se ha observado que en todos los casos, la calidad del producto cumple con las recomendaciones de la OMS. En consecuencia, manteniendo la conversión y la capacidad de la planta constantes, se reduce el consumo energético total de la planta al trabajar a presiones de alimentación menores (48.27 bar para el diseño 7 frente a 51.57 bar para el diseño 1). En el caso de mantener el caudal y la presión de alimentación constantes, la tasa de conversión conseguida puede ser aumentada hasta un 8% en comparación con un diseño convencional. Permite disminuir el coste capital ya que la instalación necesitará menos permeadores y membranas.

En conclusión, se selecciona el diseño 7 (1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i) ya que resulta ser, según los criterios de elección establecidos en 3.2.3, el que proporciona:

- Menor consumo energético específico, en ambos análisis, sin y con sistema de recuperación de energía, lo cual reduce los costes de operación (un 30% proceden de los costes vinculados por el consumo energético),
- Mejor distribución de flujo de permeado a lo largo de los elementos de membrana, y menor valor de dicho flux en el primer elemento, lo cual reduce el ensuciamiento,
- Mayor conversión, realizando las simulaciones con caudal y presión de alimentación constantes, lo cual permite incrementar el caudal de agua producto o disminuir el coste capital si se decide conservar la misma capacidad de la planta.

4

Prediseño de una planta de desalación por ósmosis inversa

En este capítulo se prediseña una planta de ósmosis inversa para dos sitios concretos en Nueva Caledonia: Poé-Bourail y Nouméa. Para cada planta se especifican los requisitos del producto, la capacidad de la planta y el sistema de producción que suministra energía al proceso de desalación con sus costes asociados.

4.1. Núcleo productivo

En el capítulo anterior, se ha seleccionado el diseño más adecuado para Nueva Caledonia. El diseño híbrido 1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i resulta ser el más ventajoso.

4.1.1. Poé-Bourail

El estudio del capítulo anterior ha sido realizado con datos de entrada correspondiente al agua de mar para el sitio de Poé-Bourail. Por lo tanto, los resultados obtenidos anteriormente definen fielmente el núcleo productivo de la planta para dicho emplazamiento. Las características de la planta, a saber el uso del agua producto, la capacidad y el consumo energético se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Características de la planta POE-BRL para una temperatura del agua de mar de 25.45°C. Condiciones de operación: (1) conversión de 45% y productividad de 83.33 m³/h constantes y (2) caudal de alimentación de 185.18 m³/h y presión de alimentación de 51.57 bar constantes.

<i>Agua producto</i>	<i>Consumo humano</i>
<i>Capacidad planta</i>	2000 m ³ /d

<i>Consumo específico</i>	Conv. y Prod. Cst (1)	2.37 kWh/m ³
	Q _{alim} y P _{alim} Cst (2)	2.44 kWh/m ³

4.1.2. Nouméa

Justificación. La elección de Nouméa para ubicar la planta se puede justificar por varias razones:

- La red hidrográfica es casi inexistente en la península de Nouméa;
- El 96% de los recursos que alimentan la ciudad son de superficie, por lo cual son vulnerables al mal tiempo;
- Existe un fenómeno particular conocido como “squats” que consiste en ocupar ilegalmente un sitio para residir en casas precarias. Se estima que afecta 8148 personas en total, siendo 6080 ocupantes permanentes [34].

Las personas que viven en los “squats” no tienen acceso al agua potable, ya que no están legalmente registradas por lo cual no se benefician del suministro. Aunque existe un plan de alojamiento social desarrollado por el ayuntamiento, el fenómeno sigue creciendo. Por lo tanto, la capacidad de la planta de desalación se calcula tomando los 6080 residentes permanentes.

Diseño del núcleo productivo. Se toma como media del consumo por cliente 100 m³/año/cliente, siendo el valor correspondiente a Francia [7]. Con una media de 3 personas por clientes, se deduce un consumo de agua de 200 640 m³/año. Así se conoce la capacidad de la planta, que debe suministrar 23 m³/hora.

Sin embargo, el estudio ha sido realizado para una temperatura del agua de mar de 25.45°C correspondiente a la estación Poé-Bourail. Teniendo acceso a la base de datos para Nouméa [23], se puede comprobar que la temperatura media es de 23.8°C.

Suponiendo una densidad de flujo de permeado de 14 l/m²/h y 7 elementos por permeador, se deduce con la ecuación (2) del apartado 3.2.2 el número de permeadores necesarios PM = 6. Ya que la temperatura del agua de mar cambia, se ponen a prueba varios diseños, resultando el diseño híbrido elegido previamente el mejor.

Tabla 4.2: Consumo específico para varios diseños. Condiciones de operación: conversión de 45% y productividad de 23 m³/h constantes. Densidad de flujo de permeado: 13.40 l/m²/h.

<i>Diseño</i>	<i>Consumo específico (kWh/m³)</i>
(1) 7 SW30HRLE 440i	3.97
(2) 2 SW30HRLE 440i + 5 SW30ULE 440i	3.73
(3) 1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i	3.71

Sistema de recuperación de energía. Según la ecuación (4) del apartado 3.4.1, el ahorro energético se expresa en función del coeficiente de dilatación cúbica, el caudal y la presión del concentrado. Una interpolación lineal permite obtener el valor de α para 23.8 °C. Las hipótesis de cálculo siguen siendo las mismas (ap. 3.4.1).

Tabla 4.3: Consumo energético específico con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión. Condiciones de operación: conversión de 45% y productividad de 23 m³/h constantes.

α (K ⁻¹)	Q_{BD} (m ³ /h)	P_{BD} (bar)	Ahorro (kWh/m ³)	Ahorro relativo (%)	Nuevo consumo (kWh/m ³)
2.776x10 ⁻⁴	28.11	46.56	1.35	36.4	2.36

También se hace el cálculo para las siguientes condiciones de operación: caudal de alimentación y presión de alimentación constantes. El consumo específico sin recuperación de energía es 3.67 kWh/m³. A notar que la producción aumenta hasta 24.95 m³/h. Los resultados se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Consumo energético específico con sistema de recuperación de energía basado en intercambiador de presión. Condiciones de operación: caudal de alimentación 51.11 m³/h y presión de alimentación 51.57 bar constantes.

α (K ⁻¹)	Q_{BD} (m ³ /h)	P_{BD} (bar)	Ahorro (kWh/m ³)	Ahorro relativo (%)	Nuevo consumo (kWh/m ³)
2.776x10 ⁻⁴	26.16	50.12	1.247	34	2.42

4.1.3. Requisitos energéticos

Ya se ha calculado el consumo energético específico para ambas plantas (siendo los valores muy parecidos entre sí). Se considera una media de 2.4 kWh/m³. Las necesidades energéticas de las plantas de desalación se presentan en la tabla 4.5. Se supone que funcionan 24 horas al día, 365 días al año.

Tabla 4.5: Requisitos energéticos para las plantas de Poé-BRL y Nouméa.

Planta	C_{esp} (kWh/m ³)	Capacidad (m ³ /d)	P_{req} (kW)	E_{req} (MWh/año)
Poé-BRL	2.4	2000	200	1.752
Nouméa	2.4	552	55.2	0.483

4.2. Sistema de producción de energía eólica

Los costes asociados al consumo energético representan entre un 20% y un 35% del coste total del agua producida [22]. Dichos costes se pueden reducir de dos formas:

Reducir el consumo energético específico. El capítulo anterior trata de obtener un diseño óptimo, adecuado al agua de Nueva Caledonia, con un consumo específico mínimo.

Reducir el coste del recurso. Según la energía esté suministrada por la red, un parque eólico o una planta termo-solar, el coste del recurso (€/kWh) será distinto. En el capítulo 2, apartado 2.2.4, se presenta el coste del recurso “red eléctrica”, para un cliente industrial (0.184 €/kWh).

Este capítulo trata de diseñar un sistema de producción de potencia, basado en la energía eólica, con el fin de comparar el coste del recurso, y por consiguiente el coste total del agua. En efecto, el uso de energías renovables para procesos de desalación resulta muy interesantes para sitios costales aislados. Además, en el caso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa, la energía eólica resulta ser la tecnología más eficiente, desarrollada y eficaz con respecto a los costes [33].

4.2.1. Selección de aerogeneradores

Nueva Caledonia está sometida a ciclones tropicales, por lo cual el clima impone algunas restricciones a la hora de elegir un tipo de equipo. Por ejemplo, un requisito imprescindible es tener un aerogenerador que pueda ser bajado al suelo en caso de alerta de huracán, y aguantar vientos de hasta 300 km/h una vez tumbada y asegurada al suelo. Dicho requisito limita la potencia de cada aerogenerador, lo cual no es un problema para los rangos de potencia considerados en el estudio.

Existen parques eólicos en Nueva Caledonia, adaptados a las condiciones locales difíciles, desarrollados por Vergnet Pacific. Siendo un suministrador ya presente en Nueva Caledonia, con una habilidad reconocida en la instalación y mantenimiento de semejantes parques eólicos, parece lógico considerar sus productos. El aerogenerador seleccionado es la turbina GEV MP C – 275 kW. Es un equipo de dos palas, robusto y ligero, especialmente diseñado para condiciones difíciles en sitios remotos. Sus características se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6: Características del equipo seleccionado: GEV MP C - 275 kW.

V_{on}/V_{off} (m/s)	Diametro rotor (m)	Altura (m)	buje	Potencia nominal (kW)	Control potencia
3.5/25.0	32	55		275	Activo: Pitch hidráulico + SCADA

4.2.2. Distribución de probabilidad

La estimación del recurso viento es esencial para el cálculo de la potencia media suministrada por el aerogenerador. Sin embargo, la potencia del viento puede variar según la ubicación y el tiempo, a varias escalas: temporada, mes, día, hora y variaciones de corto tiempo (ráfagas por ejemplo). Un valor medio de la velocidad del viento en un sitio no predice cuanta energía se podrá sacar con el aerogenerador. Por lo tanto, hace falta un modelo estadístico para estimar el recurso. Se usa en este estudio la función de distribución de probabilidad de Weibull, dada por la ecuación (5). La velocidad del

viento v se modela por una variable aleatoria, siendo k un factor de forma adimensional y c un parámetro de escala con la misma unidad que la variable (m/s).

$$pdf(v) = \begin{cases} \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) & v \geq 0; k, c > 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Los valores de k y c son desconocidos para Nueva Caledonia. Se puede considerar tres métodos de cálculo:

- Usar las estimaciones de producción suministradas por el fabricante.
- Usar los valores de k y c para Canarias.
- Calcular k y c para Nouméa y Poé a partir de la base de datos de velocidades de viento.

La primera opción sería una buena alternativa para ahorrarse cálculos largos y obtener un resultado rápido, pero impreciso. La segunda opción puede ser considerada en primera aproximación. La tabla 4.7 proporciona valores de k y c calculados para 16 estaciones meteorológicas ubicadas en el archipiélago de las islas Canarias [34].

Tabla 4.7: Valores de k y c para 16 estaciones meteorológicas en Canarias.

Estación	k (-)	c (m/s)
1 - Lanzarote	2.365	8.968
2 - Fuerteventura	2.096	6.079
3 - Fuerteventura	2.278	7.063
4 - Fuerteventura	2.442	8.002
5 - Gran Canaria	2.071	8.902
6 - Gran Canaria	2.125	6.899
7 - Gran Canaria	2.438	6.738
8 - Gran Canaria	2.822	10.129
9 - Gran Canaria	2.202	7.344
10 - Gran Canaria	1.94	9.206
11 - Gran Canaria	1.979	7.395
12 - Gran Canaria	2.052	9.263
13 - Tenerife	1.772	8.04
14 - Tenerife	1.826	4.97
15 - El Hierro	1.92	11.346
16 - La Gomera	1.894	6.375

Los valores medios son entonces un factor de forma k de 2.169 y un parámetro de escala c de 8.122 m/s. Sin embargo, se aprecia que dichos valores difieren bastante de los calculados a continuación. En efecto, el archipiélago de Canarias tiene un perfil de viento diferente al de Nueva Caledonia, en particular a los de Poé y Nouméa.

Cálculo de k y c para Poé y Nouméa. Se dispone de la base de datos suministrada por WinGuru, lo cual permite sacar dos valores esenciales para la

estimación de k y c: el valor de la velocidad media del viento $\overline{v_w}$ y el valor de la velocidad elevada al cubo media $\overline{v_w^3}$. En efecto, se debe cumplir el sistema de ecuaciones {(6);(7)}.

$$\overline{v_w} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) (m \cdot s^{-1}) \quad (6)$$

$$\overline{v_w^3} = c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) (m^3 \cdot s^{-3}) \quad (7)$$

Donde Γ es la función gamma [35].

La estación meteorológica de Poé-BRL proporciona el valor de la velocidad del viento cada 3 horas, desde el 11/01/2004 hasta el 29/12/2015. La estación meteorológica de AnseVata-NOU proporciona el valor de la velocidad del viento cada 3 horas, desde el 12/09/2003 hasta 13/01/2016. La tabla 4.8 presenta los valores de $\overline{v_w}$ y $\overline{v_w^3}$ para ambas estaciones.

Tabla 4.8: velocidad media del viento y velocidad elevada al cubo media para las estaciones de Poé-BRL y AnseVata-NOU. Altura de medida: 10 metros.

Estación	Periodo de observación	Nº de medidas	$\overline{v_w} (m \cdot s^{-1})$	$\overline{v_w^3} (m^3 \cdot s^{-3})$
Poé	2004-2015	34960	4.185	111.825
Nouméa	2003-2016	36048	5.283	208.266

Se resuelve el sistema de ecuaciones {(6);(7)} con un método iterativo. En efecto resulta complicado resolver el sistema, que involucra la función gamma, de manera analítica. Significa que, primero, se supone un valor de k, con el cual se saca un valor c_1 de c a partir de la ecuación (1) y un valor c_2 a partir de la ecuación (2). Se varia el valor de k hasta encontrar el valor que hace que $c_1 = c_2$. Una vez obtenidos los valores de k y c, se calcula el coeficiente de corrección de velocidad a 55 m (altura del buje del aerogenerador), ya que las medidas se han realizado a una altura de 10 m, según la ecuación (8).

$$\alpha(z) = \frac{v(z)}{v(z_{ref})} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (8)$$

Donde z_{ref} es la altura de referencia, a saber 10 m en este caso, y z_0 la longitud de rugosidad correspondiente a la orografía local. Se toma como valor de z_0 0.0024 m correspondiendo a un terreno abierto con superficie lisa [36]. Se obtiene un valor de $\alpha(55)=1.2045$. La tabla 4.9 proporciona los valores de k y c a la altura de referencia y a la altura del buje del aerogenerador.

Cap. 4/Prediseño de una Planta de Desalación por Ósmosis Inversa

Tabla 4.9: Parámetros k y c a la altura de referencia de 10 m y a la altura del buje de 55 m para las estaciones de Poé-BRL y Nouméa.

Estación	Parámetros y pdf a z_{ref}	Parámetros y pdf a z
Poé	$k=2.610$ $c=4.706$ m/s	$k'=2.610$ $c'=5.668$ m/s
Nouméa	$k=2.960$ $c=5.916$ m/s	$k'=2.960$ $c'=7.126$ m/s
	pdf(v,k,c)	pdf(v,k',c')

Ya se conoce la función de distribución de probabilidad para ambos sitios. Se representan dichas distribuciones frente a la curva de potencia del aerogenerador GEV MP C – 275 kW en la figura 4.1.

4.2.3. Cálculo de la potencia media anual generada por el aerogenerador

El fabricante proporciona los valores de la potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento. Por lo tanto se dispone de la curva de potencia $P_{WT}(v)$ ilustrada en la figura 4.1.

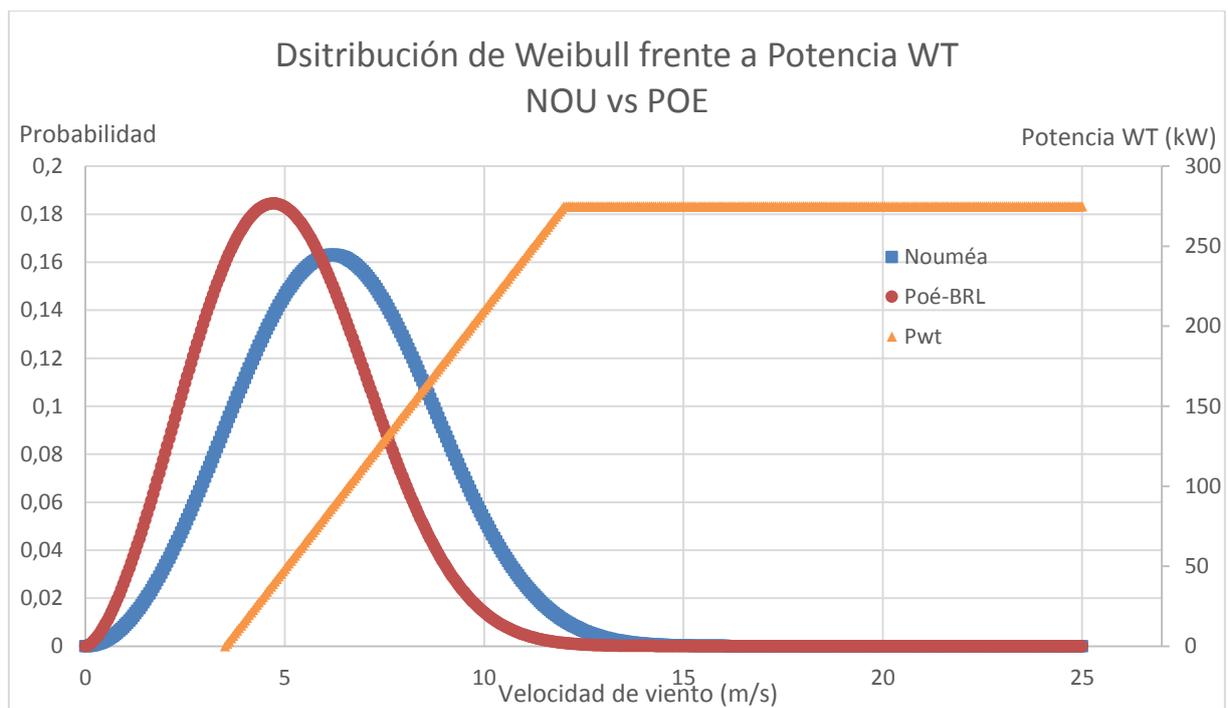


Figure 4.1: Función de distribución de probabilidad para las estaciones de Poé y Nouméa frente a la curva de potencia del aerogenerador.

La potencia media anual generada por la turbina $\overline{P_{WT}}$ se calcula integrando el producto de la curva de potencia del aerogenerador por la función de distribución de probabilidad sobre el rango de velocidades $[v_{on};v_{off}]=[3.5$ m/s;25 m/s] (ecuación 9). Ya se puede apreciar con la figura 4.1 que dicho producto será mayor en el caso de Nouméa que en el caso de Poé.

$$\overline{P_{WT}} = \int_{v_{on}}^{v_{off}} P_{WT}(v) \cdot pdf(v) \cdot dv \quad (9)$$

La figura 4.2 representa el producto $P_{WT}(v) \cdot pdf(v)$, o potencia incremental $p(v_i)$ sobre el rango de velocidades $[v_{on}; v_{off}]$. La variable continua v se ha transformado en la variable discreta v_i tomando los valores $[v_1, v_2, \dots, v_n]$, donde n es un entero y $v_1 = v_{on}$ y $v_n = v_{off}$. El cálculo de la integral se ha realizado numéricamente con Excel, a saber sumando un número de valor finito de $p(v_i)$, según la ecuación (10). Se basa en la aproximación de la integral por la suma de Riemann. El límite de dicha suma cuando n tiende al infinito es igual a la integral considerada. Por lo tanto un valor bastante grande de n proporciona una buena aproximación de $\overline{P_{WT}}$. Se ha tomado $n=430$ para el cálculo. El error relativo con respecto al cálculo analítico es despreciable (0.23%), por lo cual el valor de $n=430$ es suficiente.

$$\overline{P_{WT}} \approx \frac{v_n - v_1}{n} \cdot \sum_{v_i} p(v_i) \quad (10)$$

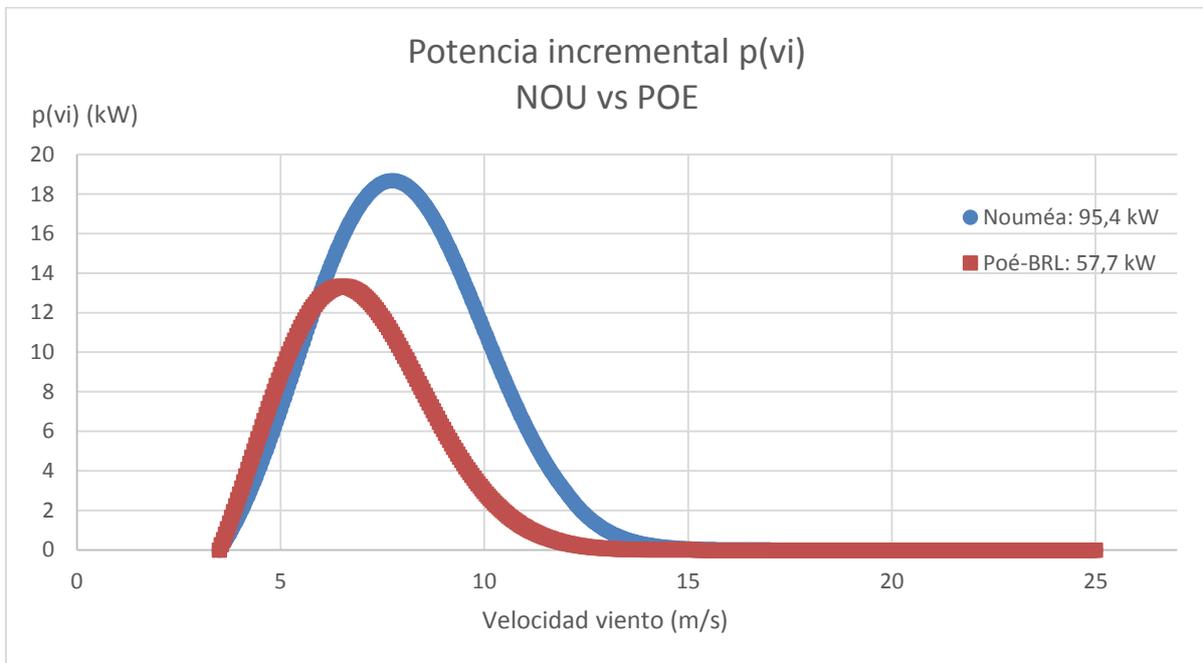


Figure 4.2: Representación del producto de la curva de potencia de la turbina por la función de probabilidad, o potencia incremental discreta, para las estaciones de Nouméa y Poé.

Los valores de $\overline{P_{WT}}$ para las dos estaciones se presentan en la figura 4.2. De acuerdo con lo previsto, $\overline{P_{WT}}$ es mayor en el caso de Nouméa, en un 39% más que el valor de Poé.

Conociendo los requisitos energéticos de ambas plantas, se deduce el número de aerogeneradores necesarios. Los resultados se resumen en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Potencia generada, potencia requerida y número de aerogeneradores necesarios para Nouméa y Poé.

Estación	$\overline{P_{WT}}$ (kW)	P_{req} (kW)	Nº Aerogeneradores
Poé	57.7	200	4
Nouméa	95.4	55.2	1

4.3. Costes

En este apartado, se va a estimar los distintos costes de la planta de desalación que aparecen en la tabla 2.7 del capítulo 2. Se trata de estimar el coste del recurso energético, el coste de operación y mantenimiento y el coste capital con el fin de calcular el coste del agua comercializada.

4.3.1. Coste del recurso

El coste del recurso se puede calcular a partir del coste total anualizado del recurso considerado y la energía consumida por año, según la ecuación (11). Ya se conoce el valor de dicho coste en el caso de usar la red para suministrar energía (0.184 €/kWh).

$$C_{recurso} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = \frac{C_{Total\ anualizado} \left(\frac{\text{€}}{\text{año}} \right)}{E_{producida} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right)} \quad (11)$$

El coste total anualizado incluye al coste capital anualizado, o coste de la inversión inicial, y al coste anual de operación y mantenimiento. Se supone un periodo de vida del aerogenerador de 20 años. Los datos de partida para llevar a cabo los cálculos se exponen en la tabla 4.11.

Tabla 4.11: Potencia instalada, energía producida anualmente y horas equivalentes para las estaciones de Poé y Nouméa.

Estación	Potencia instalada	Energía producida (MWh/año)	Horas equivalentes
Poé	4 x 275 kW	2021.8	1838 h
Nouméa	1 x 275 kW	835.7	3039 h

Se estimará el coste del recurso de tres formas:

1. Una estimación análoga, basándose directamente en los costes de proyectos similares.
2. Una estimación paramétrica, usando datos históricos y parámetros propios del proyecto.
3. Subcontratación. El coste del recurso entonces está fijado por el contrato con la empresa subcontratada.

Estimación análoga. La figura 4.3 proporciona directamente el coste del recurso en función del régimen de viento. Aparecen dos curvas correspondiendo a dos costes de inversión (o coste capital): 1100 €/kW, correspondiendo a una instalación on-shore, y 1400 €/kW correspondiendo a una instalación off-shore [37, 38]. Se considera entonces la curva correspondiendo a una inversión de 1100 €/kW.

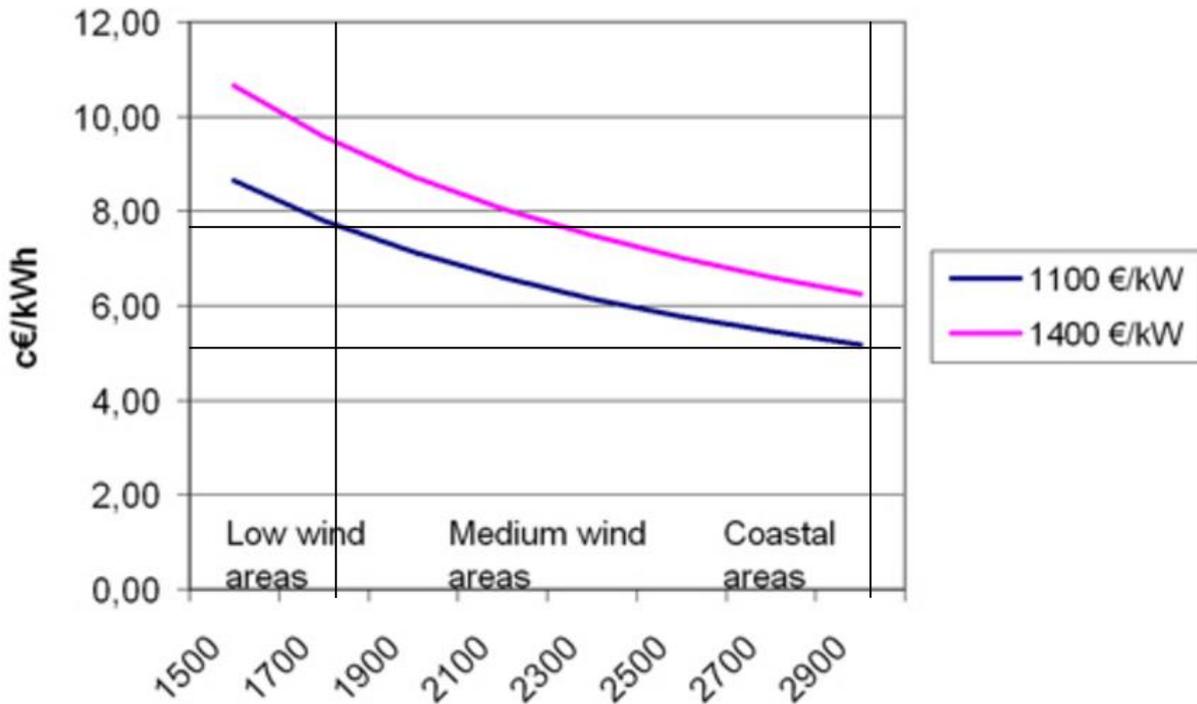


Figure 4.3: Coste del kWh en función del régimen de viento y del coste capital. Hipótesis: turbinas de tamaño medio (1.5 – 2 MW), costes de operación y mantenimiento de 1.45 c€/kWh, periodo de vida de 20 años, se desprecian los impuestos y la depreciación.

A partir de la figura 4.3, se deduce el coste del recurso para ambas plantas: 7.6 c€/kWh para Poé y 5.0 c€/kWh en el caso de Nouméa.

Estimación paramétrica. La tabla 4.12 desglosa la estructura del coste capital de una turbina [38]. Conociendo la potencia instalada, se puede deducir el coste capital anualizado.

Tabla 4.12: Estructura desglosada del coste capital de un aerogenerador.

Partida	%
Turbinas eólicas	65-75
Subestación e instalación eléctrica de distribución	10-15
<i>Instalación eléctrica de distribución interior</i>	6-9
<i>Subestación y línea eléctrica de evacuación de energía</i>	4-6
Obra civil	5-10
Instalación de componentes	0-5
Otros	5
Coste de las turbinas (€/kW)	800-1100

Se considera el coste por kW instalado de 1100 €/kW, siendo el límite superior del rango, ya que dicho rango es una estimación para aerogeneradores de tamaño medio. Los valores para Poé y Nouméa se presentan en la tabla 4.13.

El coste de operación y mantenimiento incluye a los gastos correspondientes a la mano de obra, las piezas de repuesto, el transporte, los gastos de administración y una reserva de contingencia. Según la experiencia adquirida durante una práctica realizada en Nueva Caledonia sobre el mantenimiento preventivo y correctivo de aerogeneradores, puedo estimar los recursos humanos necesarios. Para un parque de 35 aerogeneradores, se asignan cinco operarios. El salario promedio para un técnico se estima a 200000 FCFP, a saber 1667 euro/mes. Suponiendo una relación de proporcionalidad, se puede deducir el coste de la mano de obra en el caso de Poé y Nouméa. Los gastos de administración se basan en el salario de un ejecutivo/ingeniero (400000 FCFP) para el caso de Nouméa y un ingeniero más un técnico para el caso de Poé. Se supone una base existente en el sitio del parque eólico así que los gastos de transporte se deprecian. Para las piezas de repuesto se acuerda un 12% del coste de operación y mantenimiento y otros 10% de reserva para imprevistos. Los valores se presentan en la tabla 4.13.

Tabla 4.13: Estructura de los costes para Poé y Nouméa. Hipótesis: coste de la turbina de 1100 euros/kW instalado, vida útil de 20 años.

Estación	Coste Anualizado (€/año)	Capital	Coste de Operación y Mantenimiento (€/año)	Coste del recurso (centimos de €/kWh)
Poé	60500		91574	7.5
Nouméa	15125		54945	8.4

Subcontratación. La alternativa de subcontratar es interesante ya que Vergnet Pacific, además de desarrollar el proyecto de instalación de los aerogeneradores, tiene experiencia y un equipo dedicado a la operación y el mantenimiento de los aerogeneradores. Se dedica a dicha actividad, vendiendo directamente la energía producida al cliente Aerowatt. Se establece un contrato que especifica precisamente el precio de venta: 0.092 €/kWh [39]. Es mayor que el coste estimado previamente (estimación análoga y estimación paramétrica) pero garantiza un coste fijo, por lo cual es el más preciso.

4.3.2. Coste capital

El coste capital de la planta de desalación se puede desglosar en cinco categorías:

1. Los costes de construcción (o coste capital directo)
2. Los costes de ingeniería de proyecto
3. Los costes de gestión de proyecto
4. Los costes de financiación
5. Las reservas de contingencia

A continuación, se presenta en detalle y se desglosa cada tipo de coste. Al tratarse de un proyecto de baja complejidad, se eligen los valores correspondientes según Mark Wilf.

Costes de construcción. Los valores para cada coste dependen de muchos factores, tales como la ubicación, el clima, la complejidad del proyecto, las políticas y normas legales locales etc. Por lo tanto se trata de una estimación, eligiendo valores dentro del rango proporcionado por Mark Wilf. Sin embargo, los equipos de desalación por osmosis inversa son los más caros, por lo cual los costes de dichos equipos se detallan, como se puede apreciar en la tabla 4.14. Se centra en los elementos claves del sistema de desalación a saber las membranas, los permeadores, las tuberías, la estructura, la instrumentación y las bombas de alta presión. Se añade un 20% a los costes presentados en la tabla para tener en cuenta el transporte y la instalación.

Tabla 4.14: Costes de construcción de los elementos claves del sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. Se supone una tasa de conversión de dólar a euro de 0.921956. Caso de la planta de Nouméa.

<i>Elemento</i>	<i>Coste de construcción (€/elemento)</i>	<i>Número de elementos</i>
Membrana de OI para agua de mar de 8 pulgadas	369	42
Permeador para elementos de 8 pulgadas	1106	6
Montado de tuberías	187391	1
Estructura de soporte	92196	1
Instrumentación y control	18439	1
Bomba de alta presión	92196	1

La tabla 4.15 presenta la estructura del coste capital directo. Se supone un periodo de vida de la planta de 20 años y una capacidad de 552 m³/día (caso de Nouméa).

Tabla 4.15: Estructura desglosada del coste capital directo, o costes de construcción para el caso de Nouméa.

<i>Coste capital directo</i>	<i>Unitario (€/m³/d)</i>	<i>Anual (€/año)</i>
1. Preparación del terreno	46	1272
2. Toma de agua	46	1272
3. Pre tratamiento	92	2545
4. Equipos del sistema de OI	890	24561
5. Post tratamiento	18	509
6. Eliminación del concentrado	92	2545
7. Gestión de residuos	18	509
8. Sistema eléctrico y de Instrumentación	28	763
9. Equipos y servicios auxiliares	18	509
10. Edificios	92	2545
11. Inicio, encargo y aceptación	46	1272
<i>Subtotal costes de construcción</i>	1388	38302

Cap. 4/Prediseño de una Planta de Desalación por Ósmosis Inversa

Costes de ingeniería de proyectos. Dichos costes dependen sobre todo del tamaño del proyecto y la complejidad. Se presentan los componentes que se incluyen en los costes de ingeniería en la tabla 4.16. De forma similar a los costes directos, se han tomado valores dentro de los habituales.

Tabla 4.16: Estructura desglosada de los costes de ingeniería de proyectos, para el caso de Nouméa.

<i>Servicios de ingeniería de proyecto</i>	<i>Unitario (€/m³/d)</i>	<i>Anual (€/año)</i>
1. Ingeniería preliminar	18	509
2. Ensayos de prueba	9	254
3. Diseño de detalle	92	2545
4. Gestión y supervisión de la construcción	65	1781
<i>Subtotal servicios de ingeniería</i>	184	5089

Costes de gestión de proyectos. Incluye los costes asociados al desarrollo del proyecto. Engloba varias actividades, tales como la planificación, el presupuesto y la revisión administrativa, la obtención de permisos ambientales y la contratación servicios y de personal. Los costes de gestión se pueden dividir en tres categorías, cuyas estimaciones se presentan en la tabla 4.17.

Tabla 4.17: Estructura desglosada de los costes de gestión de proyectos, para el caso de Nouméa.

<i>Gestión de proyectos</i>	<i>Unitario (€/m³/d)</i>	<i>Anual (€/año)</i>
1. Administración, contratación y gestión	60	1654
2. Permisos ambientales	138	3817
3. Servicios legales	46	1272
<i>Subtotal gestión de proyectos</i>	244	6743

Costes de financiación. Los costes de financiación del proyecto son los gastos financieros para la obtención de los fondos necesarios al desarrollo del proyecto. Se desglosan en la tabla 4.18. La financiación se puede obtener del gobierno, de forma convencional (prestamos), o de forma privada. Se supone una financiación convencional. El principal del préstamo de construcción corresponde al coste capital directo y se supone una tasa de interés de 3%. Se supone que la construcción tarda 2 meses. Se calcula el interés durante la construcción según la ecuación (12).

$$Interés_{const} = Coste_{const} \cdot Tasa\ anual\ de\ interés \cdot \frac{Duración_{const}}{2} \quad (12)$$

La reserva del servicio de deuda se estima como el 10% del principal. Los otros costes financieros son gastos asociados a otras reservas a parte de las dos previamente mencionadas.

Desalación de Agua de Mar por Ósmosis Inversa en Nueva Caledonia

Tabla 4.18: Estructura desglosada de los costes de financiación del proyecto, para el caso de Nouméa.

<i>Costes de financiación</i>	<i>Anual (€/año)</i>
1. Intereses durante la construcción	191,0
2. Reserva del servicio de deuda	3830,2
3. Otros costes financieros	300,0
<i>Subtotal costes de financiación</i>	4321,2

Tabla 4.19: Estructura desglosada del coste capital total de la planta de ósmosis inversa de Nouméa.

<i>Coste capital desglosado</i>	<i>Coste (€)</i>	<i>% Coste capital</i>
<i>Coste capital directo</i>		
1. Preparación del terreno	25446,0	2,2
2. Toma de agua	25446,0	2,2
3. Pre tratamiento	50892,0	4,4
4. Equipos del sistema de OI	491218,2	42,4
5. Post tratamiento	10178,4	0,9
6. Eliminación del concentrado	50892,0	4,4
7. Gestión de residuos	10178,4	0,9
8. Sistema eléctrico y de instrumentación	15267,6	1,3
9. Equipos y servicios auxiliares	10178,4	0,9
10. Edificios	50892,0	4,4
11. Inicio, encargo y aceptación	25446,0	2,2
<i>Subtotal coste capital directo</i>	766034,8	66,1
<i>Servicios de ingeniería de proyecto</i>		
1. Ingeniería preliminar	10178,4	0,9
2. Ensayos de prueba	5089,2	0,4
3. Diseño de detalle	50892,0	4,4
4. Gestión y supervisión de la construcción	35624,4	3,1
<i>Subtotal servicios de ingeniería</i>	101783,9	8,8
<i>Gestión de proyectos</i>		
1. Administración, contratación y gestión	33079,8	2,9
2. Permisos ambientales	76338,0	6,6
3. Servicios legales	25446,0	2,2
<i>Subtotal gestión de proyectos</i>	134863,7	11,6
<i>Costes de financiación</i>		
1. Intereses durante la construcción	3820,0	0,3
2. Reserva del servicio de deuda	76604,0	6,6
3. Otros costes financieros	6000,0	0,5
<i>Subtotal costes de financiación</i>	86424,0	7,5
Contingencia	70000,0	6,0
<i>Subtotal coste capital indirecto</i>	393071,7	33,9
<i>Coste capital total</i>	1159106,5	100,0

Reserva para contingencia. Las provisiones para imprevistos dependen de la complejidad, del tamaño del proyecto y del nivel de detalle de la estimación de los

costes. Se estima entre un 5% y un 7% del coste capital para proyectos de baja complejidad. Por lo tanto se elige un valor de 6%.

La tabla 4.19 desglosa la estructura del coste capital total, sumando todos los costes calculados anteriormente.

4.3.3. Costes de operación y mantenimiento

Los costes de O&M son los costes asociados a la operación de la planta durante su vida útil. Se pueden dividir en dos categorías:

Costes fijos. Los costes fijos son independientes de la cantidad de agua producida por la planta (o nivel de actividad). Incluyen a los salarios de los trabajadores, los equipos de mantenimiento, gastos de seguimiento y control, seguros y gastos administrativos.

Costes variables. Los costes variables son proporcionales al nivel de actividad. Típicamente son gastos de suministro (energía), productos químicos, nuevas membranas de OI, nuevos filtros y gestión de los residuos.

En la tabla 4.20 aparece el coste de operación y mantenimiento desglosado. El coste más elevado es el del suministro de energía. Se considera el caso de la planta de Nouméa, a saber, un consumo energético de 2.4 kWh/m³ y una capacidad de 552 m³/d. El recurso energético puede ser la red eléctrica, con un coste de 0.184 €/kWh, o el parque eólico previamente diseñado. En el caso eólico, se considera un coste del recurso de 0.092 €/kWh. De todas las estimaciones, el valor del coste del recurso dado por la subcontratación con Vergnet es el más alto pero el que lleva un grado de incertidumbre menor.

Tabla 4.20: Estructura del coste de O&M en el caso de Nouméa, suministro de energía procedente del recurso eólico.

<i>Coste de O&M desglosado</i>	<i>Anual (€/año)</i>	<i>% Coste de O&M</i>
<i>Costes variables</i>		
1. Suministro energético	44486,8	49,0
2. Productos químicos	5572,7	6,1
3. Membranas y filtros	7430,2	8,2
4. Eliminación de residuos	3715,1	4,1
<i>Subtotal costes variables</i>	61204,8	67,5
<i>Costes fijos</i>		
1. Salarios y sueldos	6501,4	7,2
2. Mantenimiento	9824,0	10,8
3. Control y seguimiento	2043,3	2,3
4. Costes indirectos	11145,3	12,3
<i>Subtotal costes fijos</i>	29514,1	32,5
<i>Total Coste de O&M</i>	90718,9	100,0

El siguiente elemento de mayor coste es el asociado al mantenimiento. Típicamente, el coste anual de mantenimiento se puede aproximar como el 40% del coste de los equipos del sistema de desalación instalado. El resto de los valores se estima tomando un valor medio dentro del rango de los valores habituales [22].

4.3.4. Coste del agua

El coste del agua refleja todos los gastos asociados a la implementación del proyecto y a la operación de la planta durante su vida útil. Se puede dividir el coste del agua en dos categorías:

Componente fijo del coste del agua. Incluye la recuperación del coste capital y los costes fijos de O&M. Se supone una tasa de interés de la inversión (i) de 5% y un plazo de recuperación (n) de 20 años. El factor de recuperación del capital (FRC) se define según la ecuación (13).

$$FRC = \frac{\{(1 + i)^n - 1\}}{i \cdot (1 + i)^n} \quad (13)$$

Dividiendo el coste capital por el factor de recuperación del capital, se obtiene el coste capital amortizado (o anualizado), cuyo valor es 93010 €/año. Los demás componentes fijos del coste del agua corresponden a los costes fijos de O&M anuales divididos por la capacidad anual ($m^3/año$) y por el factor de disponibilidad. Se supone un factor de disponibilidad de 95%.

Componente variable del coste del agua. Corresponde a los costes variables de operación y mantenimiento anuales divididos por la capacidad anual ($m^3/año$) y por el factor de disponibilidad.

Tabla 4.21: Estructura del coste del agua para Nouméa. Recurso energético eólico.

Coste del agua desglosado	Unitario (€/m ³)	% Coste del agua
<i>Costes fijos del agua</i>		
1. Recuperación del coste capital	0,462	49,3
2. Salarios y sueldos	0,034	3,6
3. Mantenimiento	0,051	5,5
4. Control y seguimiento	0,011	1,1
5. Costes indirectos	0,058	6,2
<i>Subtotal costes fijos del agua</i>	0,616	65,8
<i>Costes variables del agua</i>		
		0,0
1. Suministro energético	0,232	24,8
2. Productos químicos	0,029	3,1
3. Membranas y filtros	0,039	4,1
4. Eliminación de residuos	0,019	2,1
<i>Subtotal costes variables del agua</i>	0,320	34,2
<i>Coste del agua total</i>	0,936	100,0

4.4. Simulación: producción eólica y producción de agua

Se trata de conocer la producción real de la planta de agua en condiciones de funcionamiento. En efecto, se tiene la base de datos de viento, por lo cual se puede calcular la energía suministrada por el sistema de producción eólico y deducir la producción de agua. La simulación se limita al caso de la planta de Nouméa.

4.4.1. Hipótesis de cálculo y procedimiento

Recurso energético. La base de datos proporciona la velocidad del viento desde el 12/09/2003 hasta el 13/01/2016, con una medida cada 3 horas. Por lo tanto el sistema de almacenamiento de energía deberá ser suficiente para suministrar la potencia requerida por la planta de desalación durante al menos 3 horas. Así las fluctuaciones del viento durante dicho periodo de 3 horas no influyen. Se decide elegir una capacidad de las baterías de 4 horas.

Planta de desalación. El punto de funcionamiento será el punto de producción nominal. Es decir, no se considera un punto de funcionamiento mínimo, ni una capacidad gradual de la planta.

Tabla 4.22: Resumen de los requisitos energéticos de la planta en el punto de funcionamiento nominal.

<i>Requisitos energéticos</i>	<i>Punto de funcionamiento nominal</i>
Caudal de agua producida, m ³ /d	552
Tasa de conversión	0.45
Potencia eléctrica requerida, kW	55.2
Consumo específico total, kWh/m ³	2.36

Descripción del funcionamiento. Según la potencia suministrada por el aerogenerador y el nivel de carga de las baterías, aparecen distintos modos de operación:

1. La potencia suministrada por el aerogenerador es superior o igual a la potencia requerida por la planta de desalación.
 - a. En este caso, el aerogenerador alimenta la planta y el exceso de potencia se dirige hacia las baterías, si no están completamente cargadas.
 - b. Si las baterías están completamente cargadas, existe un exceso de energía.
2. La potencia suministrada por el aerogenerador es inferior a la potencia requerida por la planta de desalación. En este caso, toda la potencia generada por la turbina se destina a las baterías.
 - a. Si las baterías tienen la capacidad suficiente, la planta de desalación está alimentada por las baterías.
 - b. En el caso contrario, las baterías siguen cargándose (si la producción no es nula), sin alimentar la planta. No se produce agua hasta volver a uno de los casos anteriores.

A partir del fichero Excel con los valores de viento, se calcula la producción eólica, la producción de agua de la planta de desalación y el estado de la batería, teniendo en cuenta las condiciones de operación mencionadas previamente.

4.4.2. Resultados de las simulaciones

Las simulaciones se centran en el último año (2015). Se realizan dos tipos de simulación, según el periodo de tiempo considerado.

Simulación durante un periodo de 3 días. El objetivo es de apreciar la evolución a corto plazo de la producción eólica, del estado de las baterías y de la producción de la planta de desalación. La figura 4.4 ilustra la producción eólica para el mes de junio.

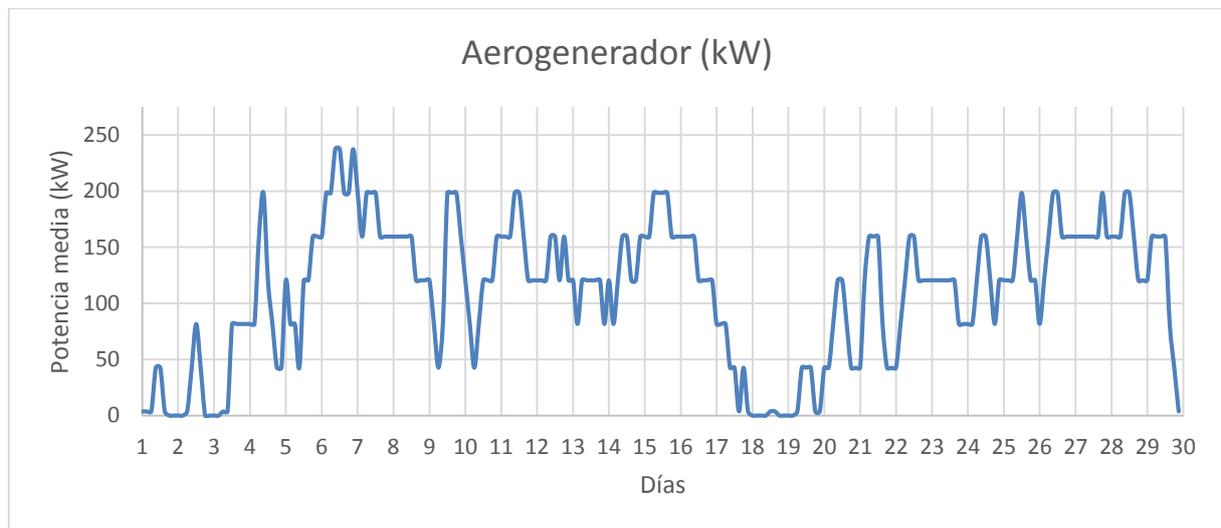


Figure 4.4: Producción del aerogenerador (kW) para el mes de junio 2015, Nouméa.

Se nota que nunca en el mes de junio, el aerogenerador llega a su producción nominal de 275 kW. En efecto, el viento no llega al valor de 12 m/s a la altura del bruje durante este periodo. Sin embargo, la potencia suministrada por la turbina es mayor que la requerida (55.2 kW) por la planta en la mayoría de los días. Se elegirán dos periodos de 3 días para la simulación, un periodo bueno y un periodo malo. Por ejemplo, los días 5-6-7 representan un periodo de buena producción eólica, y los días 17-18-19 representan un periodo malo para la producción eólica.

Las figuras 4.5 y 4.6 proporcionan un balance de energía entre la potencia eólica disponible, nivel de carga de las baterías y la potencia destinada a la planta de desalación. En el caso de tener una buena producción eólica, la planta de desalación funciona sin interrupción y las baterías están completamente cargadas, salvo a las 11h el día 5 de junio, donde las baterías compensan la bajada de producción. En el caso de tener mala producción eólica, la planta funciona de manera interrumpida. Sin embargo, las baterías permiten seguir produciendo agua aunque la producción eólica es inferior a la necesaria. Si la producción eólica baja demasiado durante varios periodos, no se produce agua, hasta que las baterías se recarguen o que la producción eólica vuelva a ser suficiente.

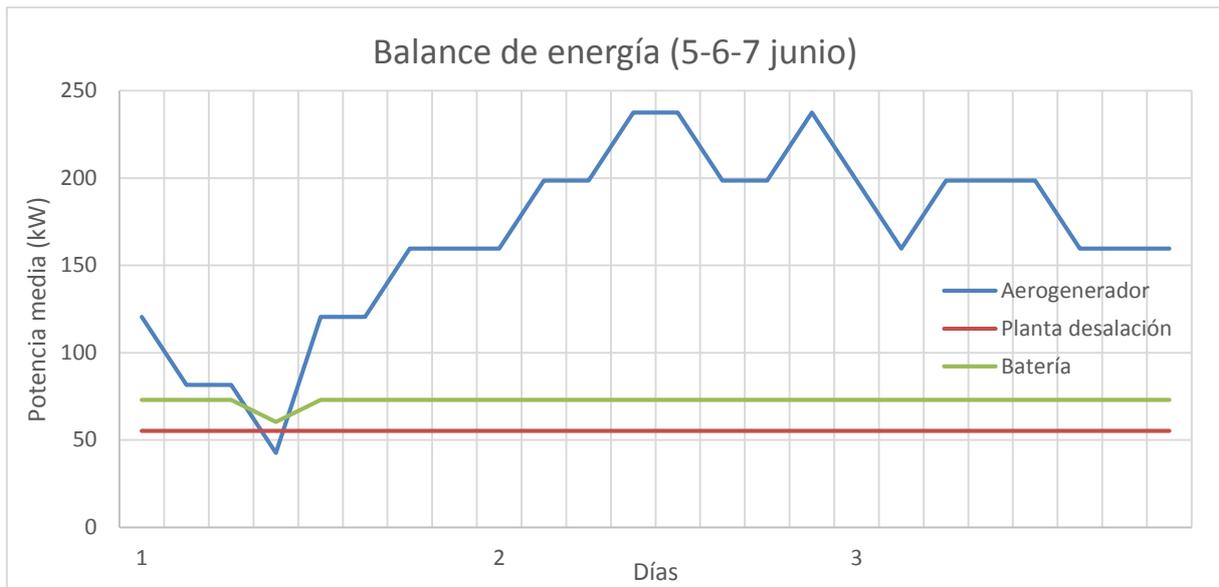


Figure 4.5: Balance de energía para un aerogenerador Vergnet GEV MP C-275 acoplado a la planta de desalación de Nouméa, de capacidad fija 552 m³/d. Periodo 5-6-7 de junio 2015.

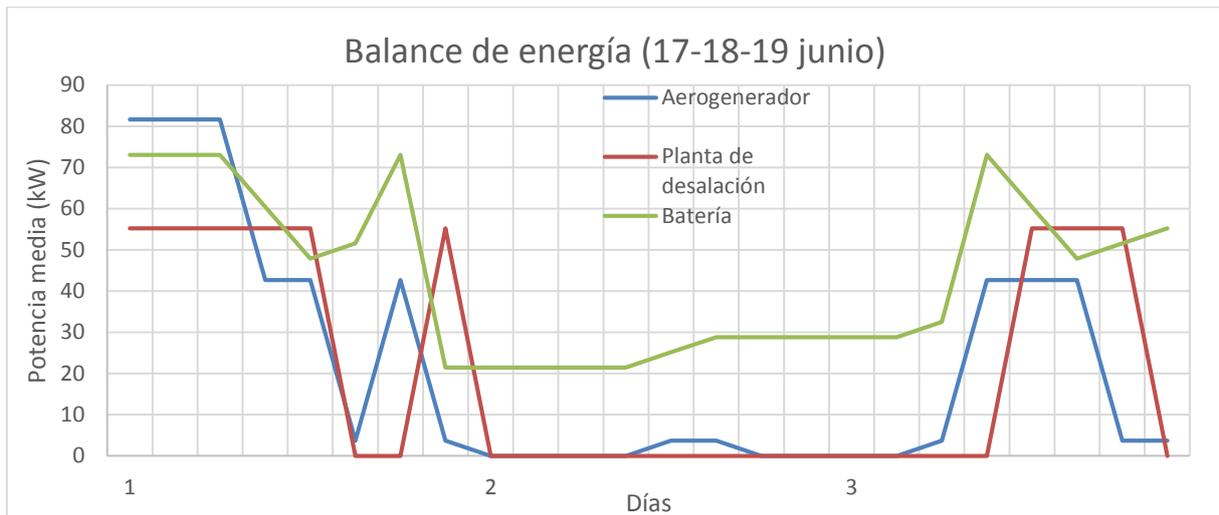


Figure 4.6: Balance de energía para un aerogenerador Vergnet GEV MP C-275 acoplado a la planta de desalación de Nouméa, de capacidad fija 552 m³/d. Periodo 17-18-19 de junio 2015.

Simulación anual. La simulación para un año completo se realiza con el fin de conocer la producción de agua durante un año según la producción eólica (figura 4.7). Se pueden deducir parámetros significativos del funcionamiento de la planta tales como el total de agua producida en el año, la tasa de operación anual, la energía consumida por la planta o el ratio de productividad. Dicho ratio se define dividiendo la producción real de la planta (m³/h) por la potencia real suministrada por el aerogenerador (kW). Es lo mismo decir que es el volumen total de agua obtenida en el año (m³) dividido por la energía producida por el aerogenerador en el año (kWh). Los resultados de la simulación se presentan en la tabla 4.23. Se aprecia una tasa de operación satisfactoria de 73%. Sin embargo, el exceso de energía es del mismo orden de magnitud que el consumo de energía de la planta. Se podría mejorar bajando la potencia de aerogenerador pero perjudicando la producción de agua, o aumentando la capacidad de

las baterías, mejorando al mismo tiempo la tasa de operación. De todas formas dicha energía perdida no se paga y es inherente a la característica intermitente del recurso eólico.

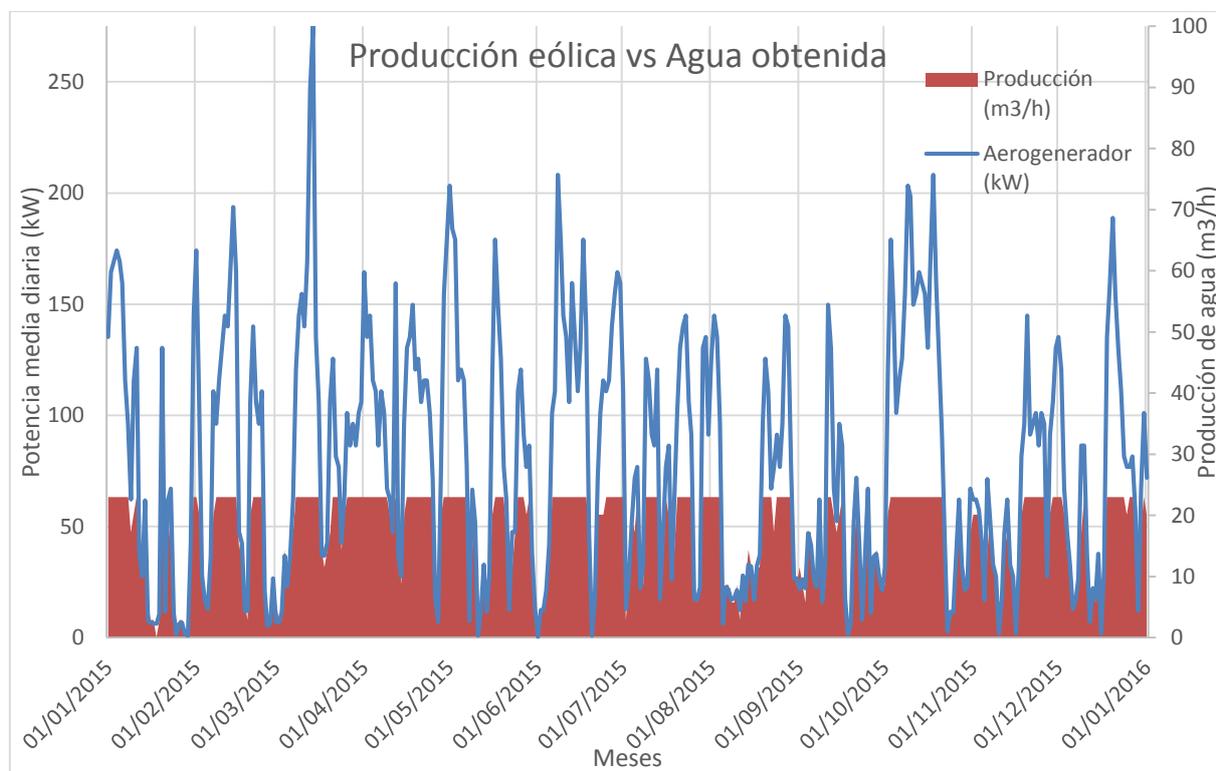


Figure 4.7: Producción eólica anual y agua obtenida con una turbina GEV MP C-275 acoplada a una planta de desalación de capacidad 552 m³/d.

Tabla 4.23: Resultados de la simulación anual (2015) para un aerogenerador GEV MP C-275 acoplado a una planta de desalación de capacidad 552 m³/d.

Simulación anual - 2015

Total agua producida, m ³	147108
Productividad media anual, m ³ /d	403
Total agua no producida, m ³	54372
Total horas de operación, h	6396
Tasa de operación anual, %	73
Total horas de parada, h	2364
Energía producida por el aerogenerador, kWh	703538
Energía consumida por la planta de desalación, kWh	353059
Exceso de energía, kWh	350479
Ratio de productividad, m ³ /kWh	0,21

5

Resultados y discusión

El objetivo de este capítulo es de sintetizar los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y proporcionar una reflexión, recordando el alcance del estudio con las limitaciones e hipótesis.

5.1. Definición del alcance

5.1.1. *Objetivo*

El estudio pretende lograr el prediseño de una planta de desalación por ósmosis inversa en Nueva Caledonia. Se trata de llegar a un diseño del núcleo productivo adecuado para el agua de mar de Nueva Caledonia, dimensionar el sistema de producción de energía, estimar los costes de la planta y el coste del agua producida.

5.1.2. *Herramientas y recursos*

Para obtener datos de entrada tales como la temperatura del agua del mar en un sitio concreto, o la velocidad del viento, se dispone de bases de datos proporcionadas por el servicio de meteorología de Nueva Caledonia y el servicio de información Windguru. *'The Guidebook to Membrane Desalination Technology'* [22] proporciona tablas para la composición del agua de mar en el océano Pacífico, y una guía para la estimación de costes. Para el diseño del núcleo productivo, se usa el programa ROSAv9. Las gráficas y los resultados de las simulaciones se obtienen con Excel. El resto de los recursos, tales como

modelos matemáticos, recomendaciones de diseño, procedimientos de cálculo, etc., proceden de las publicaciones científicas mencionadas en las referencias.

5.2. Secuencia de las actividades y discusión

Para lograr el objetivo definido en el apartado 5.1.1, se puede dividir el estudio en varias tareas, ordenadas según una secuencia que se presenta a continuación. Se recuerdan también las hipótesis retenidas para los cálculos desarrollados en cada una de las actividades.

5.2.1. Definir el contexto e introducir a la desalación por ósmosis inversa

Dicha actividad es esencial ya que aporta información sobre Nueva Caledonia con el fin de definir el contexto. Proporciona datos sobre la demografía, el consumo de agua en la isla, las reservas disponibles y el clima. Dichos datos permiten justificar la implementación de un proyecto de desalación de agua de mar. Además, permite familiarizarse con la tecnología empleada y desglosar los aspectos esenciales del proceso de desalación por ósmosis inversa.

5.2.2. Diseñar un núcleo productivo adecuado

Se trata de ir probando varios diseños con el programa ROSA, cambiando las configuraciones o el tipo de membrana, hasta llegar a un diseño adaptado a los requisitos. Las hipótesis retenidas son las siguientes:

- Composición del agua del mar del océano Pacífico
- Temperatura y pH proporcionados por el servicio de meteorología
- Capacidad de la planta: 2000 m³/d
- Densidad de flujo de permeado: 14 l/m/h
- Rendimiento del intercambiador de presión: 97%
- Caudal bombeado por la bomba booster igual al caudal de concentrado
- Presión a la salida del intercambiador de presión: 2 bar

Operando a conversión y producción constantes, o a caudal y presión de alimentación constante, el diseño híbrido 7 (1 SW30HRLE 440i + 1 SW30XLE 440i + 5 SW30ULE 440i) es el que proporciona menor consumo energético específico, por lo cual menores costes de operación. De todos los diseños, el número 7 es también el que proporciona la mejor distribución de flujo de permeado, reduciendo el ensuciamiento de las membranas. Aunque las membranas de alta rechazo proporcionan la mejor calidad de producto (diseño estándar 1), los valores de TDS y de contenido de boro cumplen para todos los diseños. Por lo tanto, el diseño 7 resulta ser el más interesante para la implementación. También, el diseño 7 proporciona mayor conversión, a presión y caudal de alimentación constantes, lo cual aumenta la producción de agua.

5.2.3. Dimensionar el sistema de producción de energía eólica

La actividad anterior ha permitido validar y seleccionar un tipo de configuración para el núcleo productivo de la planta de desalación. Por lo tanto se conoce el requisito energético de la planta. Para diseñar el parque eólico que pueda suministrar la energía necesaria a la planta de desalación, se admiten las siguientes hipótesis:

- Tipo de aerogenerador: GEV MP C – 275 kW, Vergnet
- Modelo de distribución de Weibull
- Longitud de rugosidad: 0.0024 m correspondiendo a un campo abierto con superficie lisa
- Aproximación por la suma de Riemann

La distribución de viento para Nouméa es más favorable que para Poé. En efecto se puede apreciar que la distribución de viento para Poé está centrada en una velocidad menor que para Nouméa, y existe menos varianza (distribución más estrecha). En consecuencia, el cálculo lleva a una potencia media de la turbina en el caso de Nouméa de 95.4 kW, mayor en unos 40% que en el caso de Poé.

5.2.4. Estimar los costes

Se trata de estimar los costes capitales, costes de operación y mantenimiento y el coste del agua producida por la planta de desalación. Las hipótesis retenidas para los cálculos son las siguientes:

- Coste del recurso eólico: 0.092 €/kWh
- Vida útil de la planta: 20 años
- Factor de disponibilidad: 95%
- Reserva para contingencia: 6% del coste capital
- Coste anual de mantenimiento: 40% del coste de adquisición de los equipos
- Tasa de interés de la inversión: 5%
- Plazo de recuperación de la inversión: 20 años

El procedimiento de estimación de costes se basa en la guía presentada en [22]. Los resultados se presentan en las tablas 4.19 – 4.21. Los equipos del sistema de ósmosis inversa representan 42.4% del coste capital total. Por lo tanto es relevante haber estimado de manera precisa dichos costes. Los costes de suministro energético representan 49% del coste de operación y mantenimiento, de forma que resulta muy interesante tener un consumo energético específico y un coste del recurso energético los más bajos posible. Un análisis de sensibilidad permite ver el peso que tiene el coste del recurso energético sobre el coste del agua producida:

- En el caso de un suministro eólico, con un coste de 0.092 €/kWh, el coste del agua es 0.94 €/m³.
- En el caso de suministrar energía con la red eléctrica, con un coste de 0.184 €/kWh, el coste del agua sube a 1.17 €/m³, a saber un aumento de 24.8%.

Considerando el recurso eólico, la planta permite producir agua a un coste inferior a 1 €/m³, lo cual resulta muy interesante, considerando que el precio de venta del agua en la distribución pública es de 1.08 €/m³.

5.2.5. Simular

La simulación permite observar el comportamiento del sistema {planta de desalación; aerogenerador} y comprobar que la producción eólica y el agua obtenida cumplen con lo previsto. Las hipótesis retenidas para los cálculos son las siguientes:

- Capacidad de las baterías: 4 horas de funcionamiento de la planta
- Punto de funcionamiento: nominal (55.2 kW, 23m³/h)
- Recurso eólico: base de datos

Los resultados se presentan en las figuras 4.5 – 4.7 y la tabla 4.23. Se aprecia que cuando la potencia suministrada por el aerogenerador supera la potencia requerida, la planta funciona sin interrupción y las baterías se cargan hasta llegar al estado de plena carga. Si la potencia del aerogenerador baja hasta ser inferior a la requerida, las baterías aguantan dicha bajada y suministran energía a la planta, sin interrumpir el funcionamiento durante al menos 4 horas. Sin embargo, si la potencia del aerogenerador permanece inferior a la requerida durante mucho tiempo, la planta de desalación deja de ser alimentada y no produce agua hasta que el nivel de carga de las baterías sea suficiente o que la producción eólica vuelva a superar 55.2 kW.

La producción eólica durante el año 2015 es de 703538 kWh, 15.8% menos de lo previsto con el cálculo de la potencia media de la turbina. Por lo tanto, el volumen de agua producida es inferior a lo esperado. Sin embargo, la planta funciona durante 6396 horas, a saber una tasa de operación de 73%, lo cual sigue siendo un valor alto para una planta de desalación de agua de mar acoplada a un aerogenerador.

6

Conclusiones

Se ha realizado un estudio multidisciplinar con el fin de diseñar una planta de desalación de agua del mar por ósmosis inversa en Nueva Caledonia. Al ser una isla, el agua dulce es un recurso limitado que debe ser gestionado cuidadosamente. Aunque actualmente las reservas en la isla principal Grande Terre son suficiente para cubrir el consumo humano, aún no se ha estimado la capacidad total de dichas reservas, mientras la población global y el consumo de agua por persona siguen aumentando. Además, existen problemas de sequía que afectan núcleos de población localizados, a menudo aislados. Por otra parte, la gran mayoría de los núcleos de población son costeros, con buenas condiciones de viento. En consecuencia, conviene contemplar la solución de una planta de desalación de agua del mar, acoplada con un sistema de producción de energía eólica.

A partir de las características del agua del mar en Nueva Caledonia, se han probado varios diseños del núcleo productivo de la planta de desalación. La optimización del diseño apunta a reducir el consumo energético específico, mejorar la distribución de densidad de flujo de permeado, y obviamente, cumplir con los requisitos legales acerca de las exigencias del agua para el consumo humano. Se ha demostrado que la mejor solución es un diseño híbrido que combina varios tipos de membranas del fabricante Filmtec.

Se ha diseñado el parque eólico en función de los requisitos energéticos de la planta de desalación. Nótese que, debido a las condiciones climáticas peculiares de Nueva Caledonia, se ha elegido el tipo de aerogenerador según los parques eólicos ya existentes en la isla. Se ha calculado la potencia media suministrada por el aerogenerador

suponiendo una distribución de Weibull para el viento, calculando los parámetros de dicha función a partir de valores reales del recurso eólico.

Ha resultado que la zona de Nouméa proporciona mejores condiciones de viento y mayor producción que la zona de Poé. Consecuentemente, las simulaciones se han realizado para la planta de Nouméa. Se ha calculado el comportamiento global del sistema de desalación eólico con baterías, comprobando el efecto de las baterías permitiendo suministrar energía y garantizar la producción de agua aunque el recurso eólico sea insuficiente.

La simulación para el año 2015 ha permitido comprobar que las estimaciones de producción eólica eran muy parecidas a los valores obtenidos por la simulación detallada a lo largo de todo el año.

Sin embargo, las fluctuaciones del recurso viento afectan la producción de agua. En efecto, aunque la energía proporcionada por el aerogenerador durante el año sea suficiente, las baterías tendrán una capacidad limitada. Es una característica inherente a un sistema de producción de energía eólica no conectado a la red. En las simulaciones realizadas se ha establecido que las baterías no pueden alimentar la planta durante más de 4 horas. No se puede almacenar toda la energía producida por lo que aparece un exceso de energía en fases de buena producción. Resulta que el volumen de agua producida durante el año 2015 es inferior al volumen esperado. Para aumentar el volumen de agua producida, se podría aumentar la capacidad de la planta y proveerse de un tanque de almacenamiento del agua producto que pueda compensar las horas de parada sin comprometer el cliente final. En el caso de querer independizar completamente la planta de desalación de las fluctuaciones del recurso energético, se podría contemplar una solución interconectada con la red: cuando la energía disponible es suficiente para alimentar la planta de desalación, se inyecta el exceso de producción eólica en la red, a una tarifa decidida con el agente de distribución. En el caso contrario, la planta está alimentada por la red. El coste de operación de la planta aumentaría ya que el coste del kWh es mayor en el caso de usar la red. En efecto, la estimación de costes ha permitido destacar el interés de la solución eólica, desde el punto de vista económico. El coste del agua producida resulta ser inferior al precio de venta de la distribución pública.

El estudio ha demostrado que el uso de una planta de desalación de agua del mar por ósmosis inversa alimentada por aerogeneradores sería muy interesante en Nouméa. Se podría completar la discusión con las siguientes actividades: ampliar el análisis a otros tipos de membranas, diseñar el resto de los sistemas de la planta de desalación ajenos al núcleo productivo, registrar con detalle todos los equipos y empleados necesarios, investigar el interés de una capacidad de planta gradual, considerar aerogeneradores de potencia nominal distinta, con el fin de, quizás, implementar el proyecto.

Referencias

- [1] Institut de la Statistique et des Etudes Economiques de Nouvelle-Calédonie (ISEE). <http://www.isee.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [2] Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). <http://www.insee.fr> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [3] Direction des Mines et de l’Energie en Nouvelle-Calédonie (DIMENC). <https://dimenc.gouv.nc/> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [4] Comité Environnemental Koniambo (CEK) – Province Nord & Koniambo Nickel SAS (KNS). <http://province-nord.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [5] Koniambo Nickel SAS (KNS). <http://www.koniambonickel.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [6] Degrémont, Suez Environnement. <http://www.suez-environnement.com> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [7] Démarche environnementale de Vale – VALE NC. <http://www.vale.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [8] Société Néo-calédonienne d’énergie (ENERCAL). <http://www.enercal.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [9] Synthèse des Assises de l’Eau 2008 – Comité Economique et Social de la Nouvelle-Calédonie (CES). <http://www.ces.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [10] Institut de Recherche pour le Développement (IRD). <https://es.ird.fr> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [11] Rapport Prix et Qualité du Service Public de l’Eau Potable - Ville de Nouméa. <http://www.noumea.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [12] Société Le Nickel (SLN). <http://www.sln.nc> (Última consulta: Febrero, 2016)

- [13] Nosslin. <http://www.nosslin.es> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [14] Poseidon Resources, *Carlsbad Seawater Desalination Project, Energy Minimization and Greenhouse Gas Reduction Plan*, December 10, 2008, p. 10.
- [15] Michelle K. Wittholz, Brian K. O'Neill, Chris B. Colby, David Lewis, *Estimating the cost of desalination plants using a cost database*, *Desalination*, 229, 2008, pp. 10-20.
- [16] Peñate, B. Tesis Doctoral. ETSI, Universidad de Sevilla, 2010, *Examples of different methods of mechanical interconnection* (Filmtec, 2009), p.39.
- [17] Ali Farhat, Farrukh Ahmad, Nidal Hilal, Hassan A. Arafat, *Boron removal in new generation reverse osmosis (RO) membranes using two-pass RO without pH adjustment*. *Desalination*, 310, 2012, pp. 50-59.
- [18] P. Argust, *Distribution of boron in the environment*. *Biological Trace Element Research*, 66, 1998, pp. 131-143.
- [19] Kha L. Tu, Long D. Nghiem, Allan R. Chivas, *Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications*. *Separation and purification technology*, 75, 2010, pp. 87-101.
- [20] A. Bick, G. Oron, *Post-treatment design of seawater reverse osmosis plants: boron removal technology selection for potable water production and environmental control*. *Desalination*, 178, 2005, pp. 233-246.
- [21] P. Glueckstern, M. Priel, *Optimization of boron removal in old and new SWRO systems*, *Desalination*, 156 (1-3), 2003, pp. 219-228.
- [22] Mark Wilf, *The Guidebook to Membrane Desalination Technology*. Balaban Desalination Publications, 2007.
- [23] Grand Observatoire de l'Environnement et de la Biodiversité Terrestre et Marine du Pacifique Sud. <http://www.observatoire-gops.org> (Última consulta: Febrero, 2016)
- [24] W.E. Michols, *A novel design approach for seawater plants*, presented at IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, SP05-052 Singapore, 2005.
- [25] H. Winters, *Twenty years of experience in seawater reverse osmosis and how chemicals in pretreatment affect fouling of membranes*. *Desalination*, 110, 1997, pp. 93-96.
- [26] M. Busch, V.G. Molina, Y. Maeda, W.E. Michols, J. Tonner, *Higher, more balanced flux reduces costs*. *Desalination and Water Reuse*, 18, 2009, pp. 29-32.
- [27] V. García-Molina, M. Busch, P. Sehn, *Costs savings by novel seawater reverse osmosis elements and design concepts*. *Desalination and Water Treatment*, 7, 2009, pp. 160-177.
- [28] M. Pétry, V. Bonnelye, F. Beltrán, E. Trauman, *El Colosso: An innovative design for the largest copper mine in the world*, presented at IDA World Congress, Maspalomas, Spain, 2007.

- [29] F. Muddassir, *Unique Design Features of Commercial SWRO Plants*, IDA World Congress, Maspalomas, Spain, 2007.
- [30] B. Peñate, L. García-Rodríguez, *Reverse osmosis hybrid membrane inter-stage design: A comparative performance assessment*. *Desalination*, 281, 2011, pp. 354-363.
- [31] Guidelines for drink water quality, third edition, volume one, Recommendations, World Health Organization, Geneva 2004
- [32] Dussy, Dorothée, « *Les squats de Nouméa. Des occupations océaniques spontanées à la conquête symbolique de la ville en Nouvelle-Calédonie* », *Journal de la Société des océanistes*, 103, 1996, pp. 275-28
- [33] B. Peñate, F. Castellano, A. Bello, L. García-Rodríguez, *Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability: a case study*, *Energy*, 36, 2011, pp. 4372-4384.
- [34] J.A. Carta, P. Ramírez, *Use of finite mixture distribution models in the analysis of wind energy in the Canarian Archipelago*, *Energy Conversion and Management*, 48, 2007, pp. 281-291.
- [35] Thompson WJ. Atlas for computing mathematical functions. 1st ed. New York: John Wiley & sons, Inc.; 1997.
- [36] Romero-Ternero Vicente, *Influence of the fitted probability distribution type on the annual mean power generated by wind turbines: A case study at the Canary Islands*, *Energy conversion and management*, 49, 2008, pp. 2047-2054.
- [37] Clausen, N-E, Lawaetz, H, Lemming, JK & Morthorst, PE 2008, *Technologies for production of Electricity and Heat in Sweden. Wind energy in perspective of international development*. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, Roskilde. Elforsk rapport 2500, Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R, no. 1640(EN)
- [38] Manuel Burgos Payán, Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Sevilla – E.S. de Ingeniería, Universidad de Sevilla. *Introducción de las Energías Renovables en los Sistemas Eléctricos*, Máster en Sistemas de Energía Eléctrica
- [39] Simon Eibner, *Optimisation du fonctionnement des éoliennes Vergnet et impacts sur les courbes de puissance*, Ecole des Mines d'Albi, Rapport Technique de Stage (2011).