

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Plantas de desalación de agua eólicas de gran
capacidad con respaldo de energía marina

Autor: Marta María Guillén de la Oliva

Tutor: Lourdes García Rodríguez

Baltasar Peñate Suárez

**Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Plantas de desalación de agua eólicas de gran capacidad con respaldo de energía marina

Autor:

Marta María Guillén de la Oliva

Tutores:

Dra. Lourdes García Rodríguez

Catedrática de Universidad

Dr. Baltasar Peñate Suárez

Jefe del Dpto. de Agua del Instituto Tecnológico de Canarias

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Plantas de desalación de agua eólicas de gran capacidad con respaldo de energía marina

Autor: Marta María Guillén de la Oliva

Tutor: Lourdes García Rodríguez
Baltasar Peñate Suárez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia, mis padres y mi hermana, por confiar en mí y saber llevar de la mejor manera posible todas las fases por las que la realización de este trabajo me ha llevado. Por apoyarme en todo momento y por ayudarme, en la medida de lo posible, cada vez que lo he necesitado.

Gracias a mis compañeros, a aquellos valientes que están desde el principio a mi lado y a aquellos otros que se fueron uniendo a lo largo del camino. A todos ellos por la colaboración y el apoyo ofrecido para que este trabajo y, sobre todo, los años de estudio en esta escuela se hicieran más amenos y satisfactorios.

Por último, no puedo olvidarme de agradecer inmensamente a mi tutora, Lourdes García Rodríguez, por ofrecerme la posibilidad de realizar este proyecto del que terminamos enamorándonos, por los consejos, las horas dedicadas y la ilusión con la que realiza su trabajo. Gracias.

Marta María Guillén de la Oliva

ETSI Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Resumen

Tres cuartas partes de nuestro planeta se encuentra cubierto de agua, pero tan sólo el 3% del total de esa agua es apta para el consumo, lo que denominamos “agua dulce”. Este consumo es esencial para la vida en nuestro planeta.

El proceso de desalación de agua aparece como una solución a esta escasez, ofreciendo agua dulce a partir del tratamiento de agua de mar. Este proceso necesita un aporte energético y, pensando en el futuro, la mejor opción será abastecer las plantas desaladoras de forma totalmente limpia, a partir de la generación de las energías renovables.

En este proyecto, esas energías renovables serán la energía eólica, con años de experiencia y bien acomodada en la producción y mercado energético actual, y la energía marina, más en concreto la energía mareomotriz, aún en desarrollo y con mucho potencial por aprovechar.

Abstract

Three quarters of our planet is covered with water, but only 3% of the total water is suitable for consumption, which we call "fresh water". This consumption is essential for life on our planet.

The water desalination process appears as a solution to this shortage, offering fresh water from the treatment of seawater. This process needs an energy contribution and, thinking about the future, the best option will be to supply the desalination plants in a completely clean way, from the generation of renewable energies.

In this project, these renewable energies will be wind energy, with years of experience and well-positioned in the current energy production and market, and marine energy, more specifically tidal energy, still in development and with a lot of potential to be exploited.

| | |
|---|-------------|
| Agradecimientos | vii |
| Resumen | ix |
| Abstract | xi |
| Índice | xiii |
| Índice de Figuras | xv |
| Índice de Tablas | xvii |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Objetivos</i> | 1 |
| 1.2 <i>Energía marina</i> | 1 |
| 1.2.1 Energía mareomotriz | 2 |
| 1.2.2 Generación de energía | 3 |
| 1.3 <i>Emplazamiento</i> | 4 |
| 1.3.1 Recurso marino | 4 |
| 1.3.2 Recurso eólico | 7 |
| 2. Planta de desalación | 9 |
| 2.1 <i>Condiciones de funcionamiento</i> | 9 |
| 2.2 <i>Planta desaladora sin recuperador energético</i> | 10 |
| 2.3 <i>Planta desaladora con recuperador energético</i> | 13 |
| 3. Condiciones óptimas para el aprovechamiento de energía marina | 17 |
| 4. Condiciones óptimas para el aprovechamiento de energía eólica | 31 |
| 5. Hibridación de recursos | 37 |
| 6. Análisis económico | 39 |
| 6.1 <i>Coste de la planta de desalación</i> | 39 |
| 6.2 <i>Coste del parque eólico</i> | 40 |
| 6.3 <i>Comparación de costes</i> | 40 |
| 7. Conclusiones | 43 |
| Referencias | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Mareas según latitud | 2 |
| Figura 1-2. Efecto del Sol y la Luna en las mareas | 3 |
| Figura 1-3. Localización de Derby | 5 |
| Figura 1-4. Plano del proyecto de la construcción de la estación de energía mareomotriz | 6 |
| Figura 1-5. Islas Canarias | 7 |
| Figura 2-1. Esquema del funcionamiento de la planta desaladora sin recuperador energético | 11 |
| Figura 2-2. Esquema del funcionamiento de la planta desaladora con recuperador energético | 13 |
| Figura 2-3. Esquema del funcionamiento del recuperador energético | 14 |
| Figura 3-1. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de enero | 18 |
| Figura 3-2. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de enero | 18 |
| Figura 3-3. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de febrero | 19 |
| Figura 3-4. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de febrero | 19 |
| Figura 3-5. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de marzo | 20 |
| Figura 3-6. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de marzo | 20 |
| Figura 3-7. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de abril | 21 |
| Figura 3-8. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de abril | 21 |
| Figura 3-9. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de mayo | 22 |
| Figura 3-10. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de mayo | 22 |
| Figura 3-11. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de junio | 23 |
| Figura 3-12. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de junio | 23 |
| Figura 3-13. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de julio | 24 |
| Figura 3-14. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de julio | 24 |
| Figura 3-15. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de agosto | 25 |
| Figura 3-16. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de agosto | 25 |
| Figura 3-17. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de septiembre | 26 |
| Figura 3-18. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de septiembre | 26 |
| Figura 3-19. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de octubre | 27 |
| Figura 3-20. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de octubre | 27 |
| Figura 3-21. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de noviembre | 28 |
| Figura 3-22. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de noviembre | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-23. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de diciembre | 29 |
| Figura 3-24. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de diciembre | 29 |
| Figura 3-25. Diseño preliminar de la turbina hidráulica | 30 |
| Figura 4-1. Esquema básico del sistema de energía eólica conectado a la planta de desalación | 31 |
| Figura 4-2. Diagrama de una planta desaladora de capacidad gradual | 32 |
| Figura 4-3. Factor de capacidad mensual y media anual del aerogenerador V27 | 35 |
| Figura 5-1. Potencia proporcionada por cada recurso a lo largo del día en la primera quincena de enero | 37 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabla 2-1. | Datos de los dos casos en estudio | 10 |
| Tabla 2-2. | Composición del agua de mar | 10 |
| Tabla 2-3. | Comparación de resultados de desalación de tres membranas distintas para el caso más desfavorable (37000 mg/L y 24°C) | 11 |
| Tabla 2-4. | Detalles del sistema comunes para las tres membranas en estudio | 12 |
| Tabla 2-5. | Detalles del sistema variables para las tres membranas en estudio | 12 |
| Tabla 2-6. | Detalles del sistema comunes en el caso más favorable y desfavorable para el caudal nominal y la membrana SW30 XLE440i | 12 |
| Tabla 2-7. | Detalles del sistema variables en el caso más favorable y desfavorable para el caudal nominal y la membrana SW30 XLE440i | 13 |
| Tabla 4-1. | Parámetros de diseño de las plantas de desalación de capacidad fija y gradual | 32 |
| Tabla 4-2. | Características del bloque RO de las plantas de desalación de capacidad fija y gradual | 33 |
| Tabla 4-3. | Datos mensuales y anuales de potencia generada y factor de capacidad de los distintos aerogeneradores en estudio | 33 |
| Tabla 4-4. | Valores anuales de producción de agua para las turbinas eólicas V27 y E32 | 34 |
| Tabla 6-1. | Coste de la construcción de una planta desaladora de 40000 m ³ /día de capacidad | 40 |
| Tabla 6-2. | Características y costes de los dos sistemas en estudio | 41 |

1. INTRODUCCIÓN

*El mar nunca cambia y su acción, por más que digan
los hombres, está envuelta en misterio.*

- Joseph Conrad -

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto será evaluar la viabilidad económica de la desalación de agua mediante sistemas híbridos de energías renovables marina y eólica, siendo ésta última la tecnología de desalación con energías renovables más competitiva con amplia diferencia. Por otra parte, las aplicaciones de las energías marinas a la desalación de agua son muy escasas, a pesar de la evidente concordancia de ambas tecnologías.

Se realizará primero un estudio de las condiciones óptimas para la explotación de ambos recursos.

El proyecto se va a centrar en el aprovechamiento de la energía eólica y mareomotriz para el abastecimiento de la planta de desalación, considerándose la segunda la base de la energía demandada por la planta, dada la previsibilidad de su producción y su “continuidad” y la primera la que cubra la energía restante.

Además, se llevará a cabo un estudio económico en el que se comparará el coste de producción con el sistema convencional (una planta desaladora con energía eólica) y el sistema que aprovecha tanto la energía eólica como la marina (sistema híbrido).

Como textos básicos de este capítulo pueden citarse las referencias 1-4.

1.2 Energía marina

Tres cuartas partes del planeta está cubierto por agua, formando océanos y mares, por lo que existe un gran potencial en el mundo para generar energía de forma limpia e inagotable. Existen diversas formas de generar energía a través del mar y los océanos.

- Oscilación de las olas
Las olas son provocadas por el viento en la superficie del mar. Cuanto mayor es la velocidad del viento, las ondas (olas) formadas por su causa serán de mayor envergadura.
- Diferencia de altura de mareas
Las mareas suben y bajan a niveles máximos (pleamar) y mínimos (bajamar) dejando una amplitud entre ambos puntos variable según el lugar del planeta. Estas subidas y bajadas del nivel son producto de la atracción gravitatoria del Sol y la Luna. El aprovechamiento de esta diferencia es similar al funcionamiento de las centrales hidráulicas con los saltos de altura en ríos.

- Corrientes marinas
En las profundidades existen corrientes de agua que pueden ser aprovechadas para generar energía a través de un rotor. Este método de obtención de energía es similar a la empleada en los parques eólicos, con la única diferencia del fluido de trabajo que mueve el rotor.
- Gradientes de temperatura
Entre la superficie y el fondo de los mares y océanos existe una diferencia de temperatura que puede ir desde -2°C a 25°C
- Gradientes de salinidad
Cada mar y océano tiene una salinidad determinada. En los puntos en los que dos mares u océanos se ponen en contacto existe una diferencia de presiones osmóticas que pueden ser aprovechadas para la generación de energía a través de electrodiálisis inversa.

En este proyecto se analiza la obtención de la energía a partir del segundo método, mediante la acción de las mareas. Ésta es la llamada energía mareomotriz.

1.2.1 Energía mareomotriz

Las mareas son oscilaciones periódicas del nivel del mar, por lo que se considerará una marea como el ciclo que completa una subida y una bajada del nivel del mar, volviendo al punto de partida.

La energía mareomotriz es un método de generación de energía predecible, puesto que las amplitudes de las mareas y los horarios de éstas son conocidos con antelación, por lo que la cantidad de energía y el momento de su producción pueden ser conocidos con anterioridad.

La amplitud de las mareas es distinta según el lugar del planeta, desde nula o casi nula en los mares interiores como el Mar Mediterráneo o el Mar Negro, hasta amplitudes de 16,3 metros en la Bahía de Fundy, en Canadá. Algunos de los motivos por el cual se dan estas diferencias según el lugar es el efecto de la atracción gravitatoria del Sol y la Luna, además de la inclinación del eje de rotación de la Tierra.

Como efecto de la inclinación del eje de rotación de la tierra, dependiendo de la latitud en la que se esté, se observan tres tipos de mareas. En la Latitud AB aparecen las llamadas mareas mixtas, consistentes en dos mareas al día, una más amplia y otra más pequeña. En la latitud CD aparece la denominada marea diurna, es decir, sólo se da una marea durante el día. Por último, en la latitud EF, el ecuador, se tienen mareas semidiurnas, dándose dos mareas similares (de la misma amplitud) a lo largo del día. Esto ocurre de la misma forma en el hemisferio norte y en el hemisferio sur.

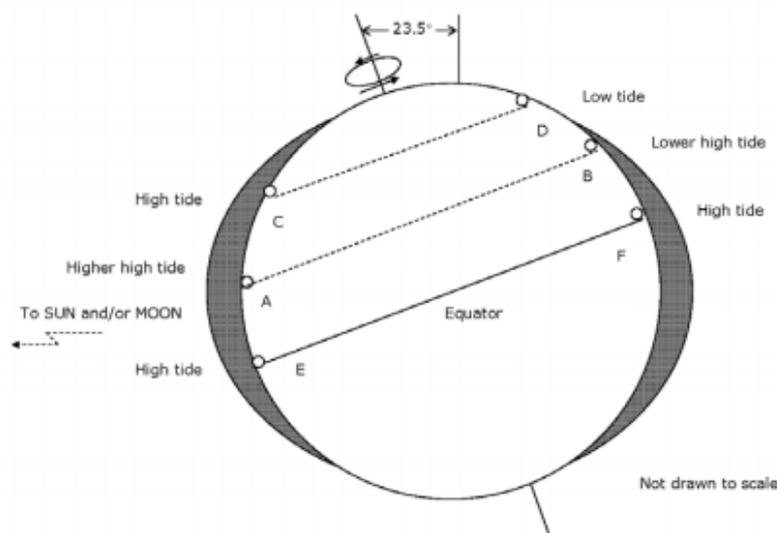


Figura 1-1. Mareas según latitud

Además, la amplitud de las mareas dependerá también de la fase lunar. Las mareas serán más amplias cuando se da la luna llena o luna nueva, puesto que el efecto de atracción gravitatoria por el Sol y la Luna se suman. Por el contrario, serán menores cuando la Luna esté en cuarto creciente y cuarto menguante por repartirse el efecto de la atracción gravitatoria.

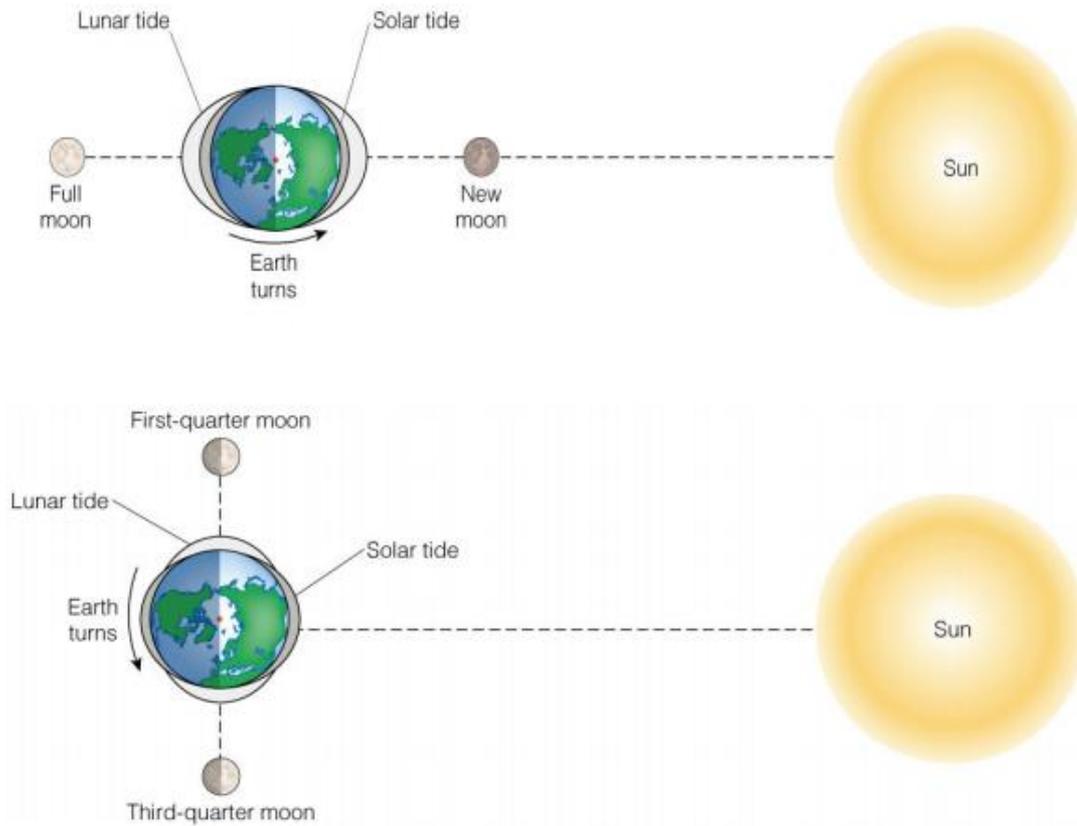


Figura 1-2. Efecto del sol y la Luna en las mareas

Ventajas de la energía mareomotriz:

- Energía renovable y limpia (no se agota y no contamina).
- Materia prima abundante y barata (la marea).
- Disponible independientemente del clima y de la época del año.

Inconvenientes de la energía mareomotriz:

- Pocos lugares aptos.
- Impacto visual y estructural sobre el paisaje.
- Impacto sobre la flora y la fauna (al igual que ocurre con las centrales hidráulicas).

1.2.2 Generación de energía

Una central mareomotriz aprovecha la energía potencial que posee el agua por la diferencia de altura y la convierte, haciéndola pasar por un grupo de turbinas, en energía eléctrica. Esta diferencia de altura necesaria se consigue a través de una barrera que separa dos masas de agua, el mar en sí y el agua retenida en el depósito obtenido por dicha barrera. Así, al aumentar el nivel del agua en uno de los lados de la barrera, se crea una diferencia de presiones que aprovecha un grupo de turbinas al hacer pasar el agua a través de ellas para igualar el nivel a ambos lados.

La obtención de energía puede realizarse de dos formas distintas:

- Single-effect cycle: las turbinas funcionan únicamente en una dirección, generando energía únicamente en el descenso del nivel del depósito (vaciado). Esto quiere decir que, cuando la marea está subiendo (flujo), las compuertas permanecen abiertas dejando que el depósito se llene al mismo ritmo que sube la marea. Una vez alcanzado el nivel máximo (pleamar), las compuertas se cierran durante el retroceso de la marea (reflujo) y se espera a que en nivel del mar esté casi al mínimo (bajamar) para descargar el agua del depósito generando energía mediante las turbinas.
- Double-effect cycle: las turbinas funcionan en ambas direcciones, lo que permite generar energía tanto en el llenado del depósito como en el vaciado del mismo. En este caso, durante la subida de la marea, el nivel del depósito está en el mínimo y las compuertas están cerradas a la espera de que la diferencia de alturas sea la adecuada para abrir las compuertas y generar energía con el paso del agua por las turbinas. Una vez se alcance el equilibrio a ambos lados de la barrera (está vez en el nivel superior), se cerrarán las compuertas reteniendo el agua en el depósito durante el retroceso de la marea para abrir de nuevo cuando se aproxima la bajamar volviendo a producir energía. Este método puede llevarse a cabo mediante dos conductos, uno de entrada y otro de salida, con sus respectivas turbinas orientadas de manera correcta, o a través de un único conducto con turbinas que puedan trabajar en ambas direcciones.

También es posible utilizar turbinas reversibles que funcionen como bombas en el sentido contrario. De este modo se puede aprovechar el excedente de energía que exista en un momento dado para bombear agua al embalse, haciendo que el nivel de éste aumente para obtener un almacenamiento extra y, por lo tanto, una mayor producción de energía en el siguiente vaciado.

Para este proyecto se va a considerar una variante de “single-effect cycle”, consistente en un sistema de dos cuencas, una superior y otra inferior. El método de funcionamiento consiste en abrir las compuertas de la cuenca superior dejando entrar el agua del mar mientras el nivel del mar aumenta y éste sea superior al de dicha cuenca. Las compuertas se cierran tras alcanzar la pleamar, cuando el nivel del mar y de la cuenca superior vuelven a coincidir, dejando la cuenca superior en su nivel máximo. El paso de agua entre la cuenca superior e inferior a través de las turbinas para producir energía es continuo. La cuenca inferior, que se encuentra con las compuertas cerradas, estará aumentando su nivel hasta que el nivel del mar, que está en descenso, coincida con el de la cuenca. En ese momento las compuertas se abrirán para drenar hasta que, tras la bajamar, el nivel del mar y de la cuenca inferior vuelvan a coincidir. Las compuertas se cerrarán mientras sube la marea en el momento en el que el nivel del mar coincida nuevamente con el de la cuenca superior, volviendo al punto de inicio del ciclo. Se puede observar que la generación se realiza en una dirección.

1.3 Emplazamiento

Es complicado encontrar una localización en la que se cumplan todas las condiciones necesarias para la realización del sistema híbrido que se está proponiendo en este proyecto. Para ello es necesario: una marea lo suficientemente amplia para poder instalar una central que aproveche la diferencia de alturas, que debe ser mayor a 5 metros, puesto que no es rentable su explotación para alturas menores, un lugar potencialmente bueno para la instalación de un parque eólico, y una zona árida con una población mediana donde pueda ser necesario el tratamiento de desalación del agua. Es por eso por lo que en este proyecto se van a dar las indicaciones y requisitos de los lugares óptimos para la captación de estos dos tipos de energía.

1.3.1 Recurso marino

Para la instalación de una central mareomotriz que aproveche la energía del mar, se ha elegido Derby. Se trata de una ciudad de la región de Kimberley, en el estado de Australia Occidental. Se encuentra en una zona de clima semiárido, de latitud $-17,39^\circ$ y longitud $123,68^\circ$. En la costa de Derby se alcanza una amplitud media de las mareas de 7 metros, siendo la marea menos amplia de 6 metros y la más amplia de 11,5 metros.

Para el estudio que se va a realizar en este proyecto se va a aprovechar una estación de energía mareomotriz que se encuentra en construcción en la desembocadura de Doctor's Creek, a aproximadamente 14 km al norte de la ciudad de Derby. Se trata de dos ramas de agua, separadas por una península, las cuales serán las cuencas de dicha estación de energía (ver imagen adjunta del plano del proyecto de la construcción en la Figura 1-4).

La capacidad de la central será de 40 MW, en la que se dispondrá de 5 turbinas generadoras de 8MW cada una, con posibilidad de ampliar a 75-80 MW, con el correspondiente aumento del número de turbinas.

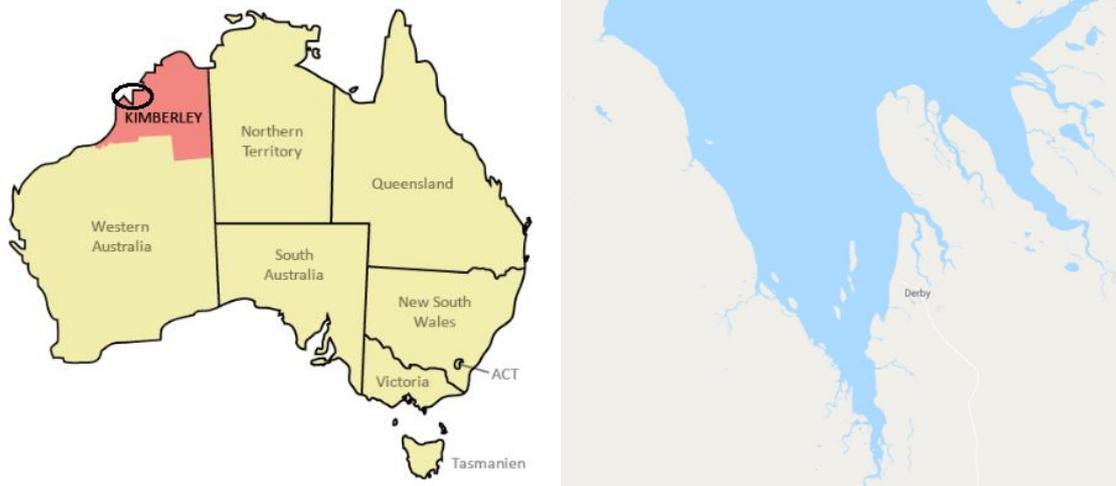


Figura 1-3. Localización de Derby

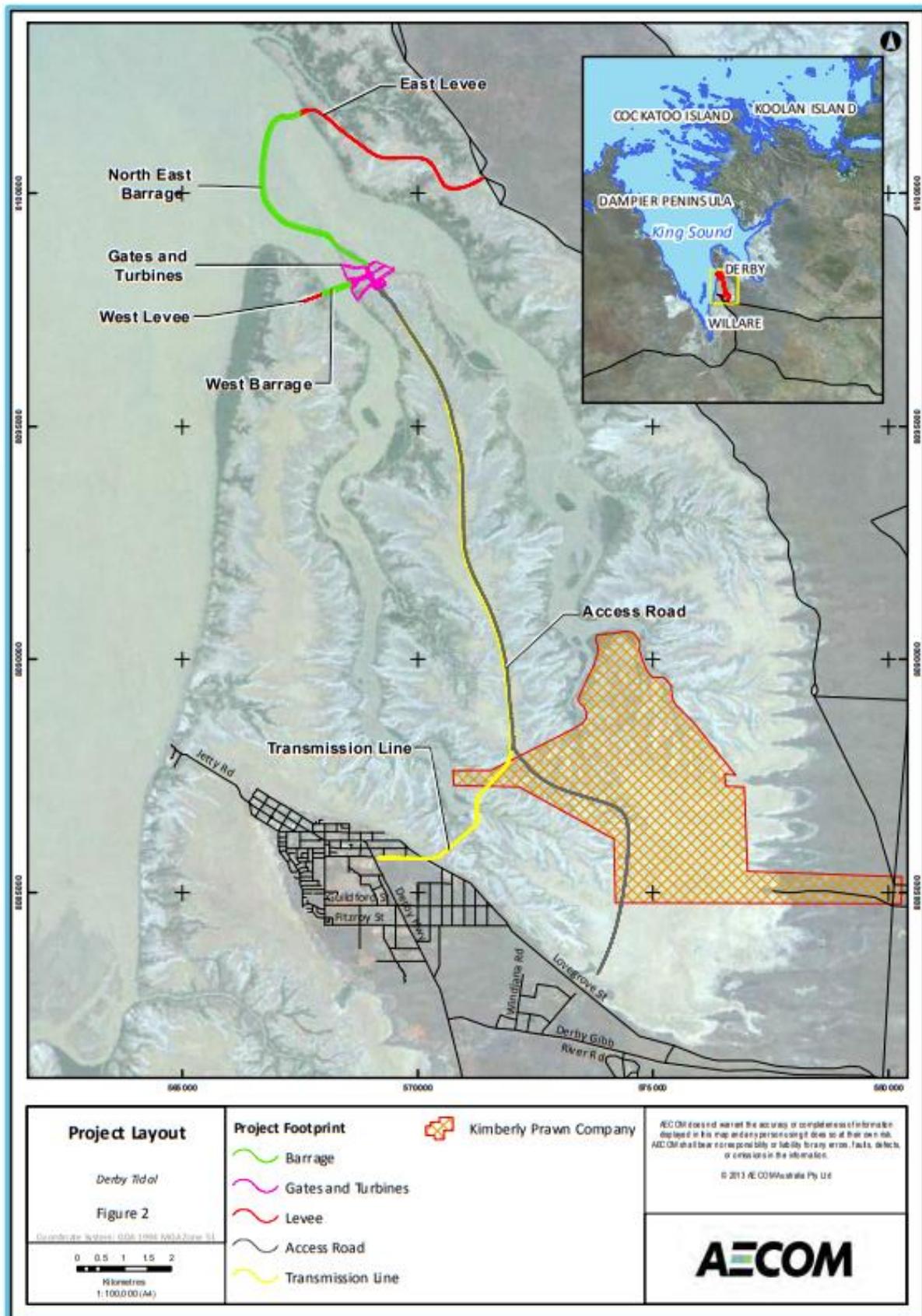
La instalación se compone de dos cuencas, una en la rama oeste (cuenca superior) y otra en la rama este (cuenca inferior), separadas por una península. Las presas serán construidas desde el extremo norte de la península que separa las ramas hasta las orillas de cada lado, cerrando ambas ramas. Los diques se construirán desde el final de las presas hasta un terreno más elevado para evitar que el agua fluya por las llanuras en las pleamares.

En el extremo de la península se construirá un canal que albergará las compuertas de las cuencas, las turbinas y los generadores. El flujo es de dirección única, desde la cuenca superior hacia la cuenca inferior. Esta configuración de la central permite que la producción energética se realice de forma continuada las 24 horas del día, los 365 días del año, siempre y cuando no se produzca alguna avería en la central.

El acceso a la central eléctrica se realizará a través de un camino en la parte más elevada de la península, al igual que las líneas de transmisión y otros servicios.

Se colocarán 14 compuertas, de 6,5 metros de altura y 10 metros de ancho, que permiten la entrada del agua en la cuenca alta y 8 compuertas de las mismas dimensiones que permiten la salida del agua de la cuenca inferior.

La central tiene una vida útil de 120 años para las estructuras fijas (presa, diques...) y de 40 años para los elementos mecánicos (turbinas). Los elementos mecánicos se reemplazarán para seguir produciendo hasta alcanzar la vida útil de las estructuras fijas.



Issue: 04/01/2014 at 10:40 AM by: [redacted]
 000000000 - Derby Tidal - [redacted]
 Issue Printed: 20/01/14

Figura 1-4. Plano del proyecto de la construcción de la estación de energía mareomotriz [4]

1.3.2 Recurso eólico

Una localización que posee buenas condiciones y requisitos para la instalación de un parque eólico son las Islas Canarias. En ellas se realizan numerosos estudios sobre este recurso energético por ser la que mejores datos presenta en el planeta. Más en concreto, los datos que se van a considerar serán de la isla de Fuerteventura. Se utilizará como fuente la base de datos METEONORM.



Figura 1-5. Islas Canarias

2. PLANTA DE DESALACIÓN

2.1 Condiciones de funcionamiento

Para el dimensionado de la planta de desalación es necesario hacer un estudio del lugar en el que se va a realizar la instalación de dicha planta. Los datos necesarios son el consumo de agua que se va a dar en la zona y las características del agua de mar que se va a tratar. Para este proyecto se va a considerar los datos de la ciudad de Derby, donde se sitúa la central mareomotriz.

Según la Unión Europea, el consumo de agua por persona en estado de estrés hídrico (“water stress”) es de 1000 m³/año [5]. Si suponemos una actividad normal y teniendo en cuenta que en la zona existen diversas industrias, se decide estimar un consumo de 2000 m³/año por persona.

Se conoce que la ciudad de Derby tiene una extensión de 104080 km² y una población de 7940 habitantes [6], con lo que la planta desaladora tendrá que tener una capacidad mínima de, aproximadamente, 45000 m³/día.

Cuando la planta se alimenta de energías renovables se debe sobredimensionar proporcionándole el doble de la capacidad nominal por los posibles cortes de suministro energético, pero en este caso se conoce que esto no ocurrirá puesto que, la base del suministro eléctrico de la planta recaerá sobre la energía generada por una de las turbinas instalada en la central mareomotriz mediante, proporcionando de este modo entre 4,5 MW y 7 MW de potencia a la planta desaladora.

La composición del agua de mar de la costa de Derby, en cuanto a la proporción de los iones, es la misma que la que se encuentra en las costas de las Islas Canarias, con la diferencia de que en Derby el agua de mar está más diluida, menos concentrada [7][8].

Una vez conocidas las salinidades entre las que se mueve el agua de mar de Derby y la salinidad del agua de mar de las Islas Canarias, se realiza un balance de materia con el que se obtendrá la composición de Derby en dos casos:

- Caso más favorable: Menor temperatura y menor salinidad (16 °C – 35000 mg/L)
- Caso más desfavorable: Mayor temperatura y mayor salinidad (24 °C – 37000 mg/L)

Para realizar el balance de materia se debe trabajar con términos de concentración, por lo que los datos de salinidad deben ser modificados a través de la siguiente ecuación:

$$C \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = S \left[\frac{Kg}{Kg} \right] \cdot \rho \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \rightarrow \quad C \left[\frac{mg}{L} \right] = C \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \cdot 10^3 \left[\frac{mg \cdot m^3}{Kg \cdot L} \right]$$

A continuación, se calcula la diferencia de disolvente que existe entre ambas aguas mediante la siguiente ecuación, siendo *j* cada uno de los dos casos que se van a estudiar:

$$S_{Derby,total,j} = \frac{S_{ref,total}}{1 + \Delta D}$$

- *ref*: referencia (Islas Canarias).
- ΔD : diferencia de disolvente.

Una vez conocida esta diferencia, que será un incremento, se puede obtener la concentración de cada ion de la misma forma, siendo i el ion en estudio:

$$S_{Derby,i,j} = \frac{S_{ref,i}}{1 + \Delta D}$$

| | Densidad (kg/m3) | TDS (mg/L) | TDS (kg/kg) | Temperatura (°C) |
|---------|------------------|------------|-------------|------------------|
| Derby 1 | 1025,5 | 35000 | 0,03413 | 16 |
| Derby 2 | 1025,5 | 37000 | 0,03608 | 24 |

Tabla 2-1. Datos de los dos casos en estudio.

| Calculo de incremento de disolvente Derby 1 (TDS=35000) | | | | | | 0,13490 kg |
|---|------------------|--------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| Calculo de incremento de disolvente Derby 2 (TDS=37000) | | | | | | 0,07355 kg |
| Iones | Referencia (ppm) | Referencia (kg/kg) | Derby 1 (kg/kg) | Derby 1 (mg/L) | Derby 2 (kg/kg) | Derby 2 (mg/L) |
| Potasio (K) | 429 | 0,000429 | 0,000378008 | 387,6469328 | 0,000399608 | 409,7981861 |
| Sodio (Na) | 11700 | 0,0117 | 0,010309302 | 10572,18908 | 0,010898405 | 11176,31417 |
| Magnesio (Mg) | 1526 | 0,001526 | 0,001344615 | 1378,902609 | 0,00142145 | 1457,697044 |
| Calcio (Ca) | 464 | 0,000464 | 0,000408848 | 419,2731394 | 0,00043221 | 443,2316045 |
| Carbonato (CO3) | 3,2 | 0,0000032 | 2,81964E-06 | 2,891538892 | 2,98076E-06 | 3,056769686 |
| Bicarbonato | 204 | 0,000204 | 0,000179752 | 184,3356044 | 0,000190023 | 194,8690675 |
| Cloro (Cl) | 21344 | 0,021344 | 0,018806986 | 19286,56441 | 0,019881671 | 20388,65381 |
| Sulfato (SO4) | 3059 | 0,003059 | 0,002695398 | 2764,13046 | 0,002849421 | 2922,080772 |
| Boro (B) | 4,5 | 0,0000045 | 3,96512E-06 | 4,066226568 | 4,19169E-06 | 4,298582371 |
| TDS | 38733,7 | 0,0387337 | 0,034129693 | 35000 | 0,036079961 | 37000 |

Tabla 2-2. Composición del agua de mar.

2.2 Planta desaladora sin recuperador energético

Una vez conocida la composición del agua de mar de Derby, se introducen los datos en el software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis) para obtener más detalles del proceso, como es el consumo de la planta. Este software calcula parámetros de consumo sin recuperador energético (véase la Figura 2-1). Para ello se decide probar 3 tipos de membranas, que se compararán con el fin de elegir la que presente mejores resultados para el caso más desfavorable, dado que será el que más limitaciones puede suponer al sistema.

Principalmente, se busca que se cumplan requisitos como que el agua permeada (el producto) tenga una salinidad menor a 500 mg/L, siendo mucho mejor unos resultados inferiores a 300 mg/L si fuera posible.

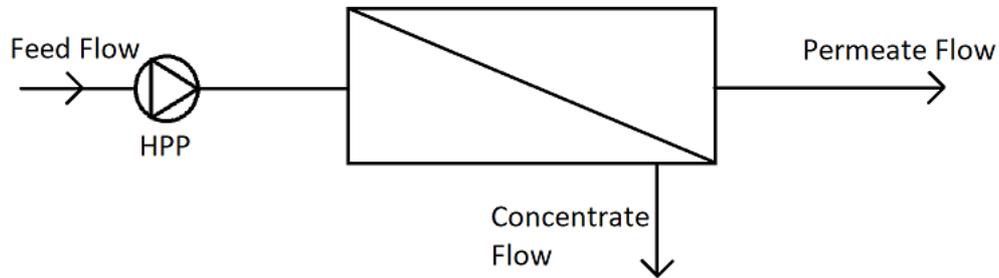


Figura 2-1. Esquema del funcionamiento de la planta desaladora sin recuperador energético

El número de tubos lo determinará el caudal de permeado que se desee obtener. En este caso, el caudal de permeado es el de consumo calculado previamente: 45000 m³/día; 1875 m³/h. Para este caudal serán necesarios 514 tubos, puesto que cada uno de ellos proporcionará un caudal de permeado de 3,65 m³/h.

Los resultados obtenidos para los 3 tipos de membrana son:

| Pass Streams | | | | | | | |
|---------------|----------|---------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| (mg/L as Ion) | | | | | | | |
| Name | Feed | SW30 HRLE440i | | SW30 ULE440i | | SW30 XLE440i | |
| | | Concentrate | Permeate | Concentrate | Permeate | Concentrate | Permeate |
| NH4++NH3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| K | 409,80 | 704,46 | 2,77 | 702,28 | 5,97 | 704,11 | 3,31 |
| Na | 11200,88 | 19261,93 | 66,00 | 19210,14 | 142,35 | 19253,66 | 78,77 |
| Mg | 1457,70 | 2511,55 | 1,99 | 2510,32 | 4,33 | 2511,40 | 2,38 |
| Ca | 443,23 | 763,68 | 0,60 | 763,31 | 1,30 | 763,63 | 0,71 |
| Sr | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ba | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CO3 | 15,86 | 30,24 | 0,00 | 30,29 | 0,00 | 30,26 | 0,00 |
| HCO3 | 194,87 | 329,43 | 1,55 | 328,32 | 3,19 | 329,24 | 1,82 |
| NO3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cl | 20388,65 | 35069,93 | 109,17 | 34984,80 | 235,51 | 35056,40 | 130,29 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SO4 | 2922,08 | 5036,38 | 1,56 | 5035,97 | 3,39 | 5036,42 | 1,86 |
| SiO2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Boron | 4,30 | 6,78 | 0,88 | 6,40 | 1,41 | 6,67 | 1,03 |
| CO2 | 1,57 | 3,05 | 1,95 | 3,02 | 1,92 | 3,04 | 1,95 |
| TDS | 37057,66 | 63746,35 | 188,69 | 63601,99 | 404,11 | 63723,24 | 225,06 |
| pH | 7,80 | 7,79 | 6,06 | 7,79 | 6,35 | 7,79 | 6,12 |

Tabla 2-3. Comparación de resultados de desalación de tres membranas distintas para el caso más desfavorable (37000 mg/L y 24 °C).

| Datos comunes en las tres membranas | | Pass 1 Permeate Flow (m ³ /h) | 3,65 |
|--|--------|--|----------|
| Feed Flow to Stage 1 (m ³ /h) | 8,69 | Pass 1 Recovery (%) | 42,00 |
| Raw Water Flow to System (m ³ /h) | 8,69 | Feed Temperature (°C) | 24,0 |
| Flow Factor | 0,85 | Feed TDS (mg/L) | 37057,66 |
| Chem. Dose | None | Number of Elements | 7 |
| Total Active Area (m ²) | 286,13 | Average Pass 1 Flux (lmh) | 12,76 |

Tabla 2-4. Detalles del sistema comunes para las tres membranas en estudio.

| | | SW30 HRLE440i | SW30 ULE440i | SW30 XLE440i |
|---------------------------------------|-------------------|---------------|--------------|--------------|
| Feed Pressure (bar) | | 53,35 | 49,39 | 51,26 |
| Osmotic Pressure | Feed (bar) | 26,01 | 26,01 | 26,01 |
| | Concentrate (bar) | 45,96 | 45,84 | 45,94 |
| | Average (bar) | 35,98 | 35,92 | 35,97 |
| | Average NDP (bar) | 16,55 | 12,84 | 14,51 |
| Power (kW) | | 16,10 | 14,91 | 15,47 |
| Specific Energy (kWh/m ³) | | 4,41 | 4,08 | 4,24 |
| Feed Flow (m ³ /h) | | 8,69 | 8,69 | 8,69 |
| Feed Press (bar) | | 53,00 | 49,04 | 50,91 |
| Recirc Flow (m ³ /h) | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Conc Flow (m ³ /h) | | 5,04 | 5,04 | 5,04 |
| Conc Press (bar) | | 51,76 | 47,84 | 49,69 |
| Perm Flow (m ³ /h) | | 3,65 | 3,65 | 3,65 |
| Avg Flux (lmh) | | 12,75 | 12,76 | 12,76 |
| Perm Press (bar) | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Boost Press (bar) | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Perm TDS (mg/L) | | 188,69 | 404,11 | 225,06 |

Tabla 2-5. Detalles del sistema variables para las tres membranas en estudio.

Se observa que con la membrana SW30 XLE440i se obtienen mejores resultados en cuanto a salinidad del permeado y una energía específica intermedia respecto a las otras dos membranas. Se decide por lo tanto que la membrana que se va a utilizar para continuar con el estudio sea ésta.

A continuación, se muestran los detalles del sistema y los resultados de la desalación de la planta dimensionada para el caudal de permeado deseado:

| Variables | Común | Variables | Común |
|--|-----------|---------------------------|-------|
| Feed Flow (m ³ /h) | 4464,29 | Pass 1 Recovery (%) | 42,00 |
| Raw Water Flow to System (m ³ /h) | 4464,29 | Average Pass 1 Flux (lmh) | 12,75 |
| Flow Factor | 0,85 | #PV | 514 |
| Chem. Dose | None | #Ele | 7 |
| Total Active Area (m ²) | 147071,85 | Number of Elements | 3598 |

Tabla 2-6. Detalles del sistema comunes en el caso más favorable y desfavorable para el caudal nominal y la membrana SW30 XLE440i

| Variables | | Favorable | Desfavorable | Variables | Favorable | Desfavorable |
|--|-------------------|-----------|--------------|---------------------------------|-----------|--------------|
| Feed Pressure (bar) | | 50,20 | 51,25 | Recirc Flow (m ³ /h) | 0,00 | 0,00 |
| Pass 1 Permeate Flow (m ³ /h) | | 1875,13 | 1874,84 | Feed Press (bar) | 49,86 | 50,91 |
| Feed Temperature (°C) | | 16,0 | 24,0 | Conc Flow (m ³ /h) | 2589,16 | 2589,44 |
| Feed TDS (mg/L) | | 35046,44 | 37057,66 | Conc Press (bar) | 48,46 | 49,69 |
| Osmotic Pressure | Feed (bar) | 23,82 | 26,01 | Perm Flow (m ³ /h) | 1875,13 | 1874,84 |
| | Concentrate (bar) | 41,92 | 45,94 | Avg Flux (lmh) | 12,75 | 12,75 |
| | Average (bar) | 32,87 | 35,97 | Perm Press (bar) | 0,00 | 0,00 |
| | Average NDP (bar) | 16,39 | 14,50 | Boost Press (bar) | 0,00 | 0,00 |
| Power (kW) | | 7783,33 | 7945,97 | Perm TDS (mg/L) | 135,12 | 225,20 |
| Specific Energy (kW/m ³) | | 4,15 | 4,24 | | | |

Tabla 2-7. Detalles del sistema variables en el caso mas favorable y desfavorable para el caudal nominal y la membrana SW30 XLE440i

Estos resultados nos muestran que la planta desaladora, sin recuperador energético, consumirá una potencia de aproximadamente 8 MW.

2.3 Planta desaladora con recuperador energético

Se va a considerar entonces para el estudio una planta desaladora de 8 MW de potencia alimentada energéticamente mediante energía eólica y mareomotriz. Esta planta puede tener un consumo específico menor si se instala un recuperador energético, proporcionando así, para la misma potencia, un caudal de producto mayor.

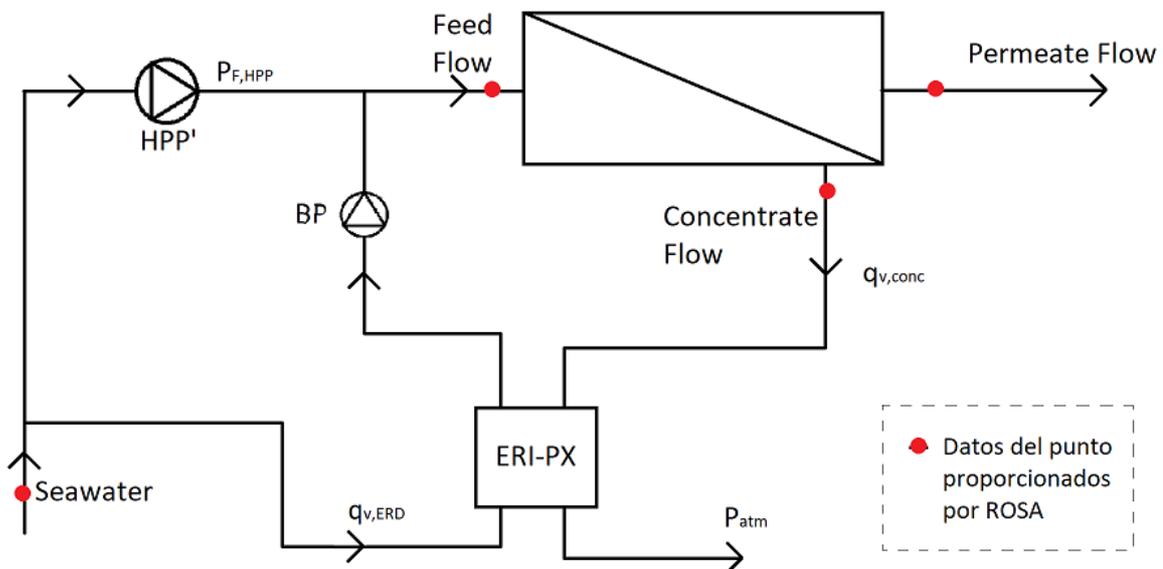


Figura 2-2. Esquema del funcionamiento de la planta desaladora con recuperador energético

Las características del agua que se va a tratar en la planta son las mismas que se han usado para el dimensionado. Se analiza el caso más desfavorable (24 °C y 37000 mg/L) puesto que será el que mayor consumo energético presenta. Los datos en los puntos rojos son conocidos, obtenidos mediante la simulación de la planta sin recuperador energético en ROSA.

En primer lugar, se calcula el caudal volumétrico que pasa por el recuperador ($q_{v,ERD}$), que depende de la presión del concentrado (P_{conc}) y de las especificaciones técnicas del ERI [9].

$$q_{v,ERD} = q_{v,BD} \cdot \frac{(P_{Feed,in} - LP_DP) - P_{Conc,in} \cdot Eff}{P_{Feed,in} \cdot Eff - (P_{Conc,in} - HP_DP)}$$

$$q_{v,BD} = \left(\frac{1}{r_m}\right) \cdot \frac{q_{v,Perm} \cdot \rho_{Perm}}{\rho_{Feed}}$$

$$Eff = \frac{\sum(Pressure \cdot Flow)_{out}}{\sum(Pressure \cdot Flow)_{in}} = 0,95$$

$$HP_DP = P_{Conc,in} - P_{Feed,out} = 0,7bar$$

$$LP_DP = P_{Feed,in} - P_{ambiente} = 0,6 bar$$

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene que el caudal que pasa por el recuperador energético ($q_{v,ERD}$) es 2525,5 m³/h.

A continuación, se calcula el consumo de la planta cuando tiene instalado este recuperador. Este consumo será la suma de la nueva potencia de la bomba de alta presión (HPP'), que será menor por bombear un caudal menor y la potencia del Booster (BP), que se encarga de contrarrestar las pérdidas de presión que se producen en el bastidor (diferencia de presión entre 'Feed Flow' y 'Concentrate Flow') y las pérdidas de presión que se producen en el recuperador energético (diferencia de presión entre 'Concentrate in' y 'Feed out').

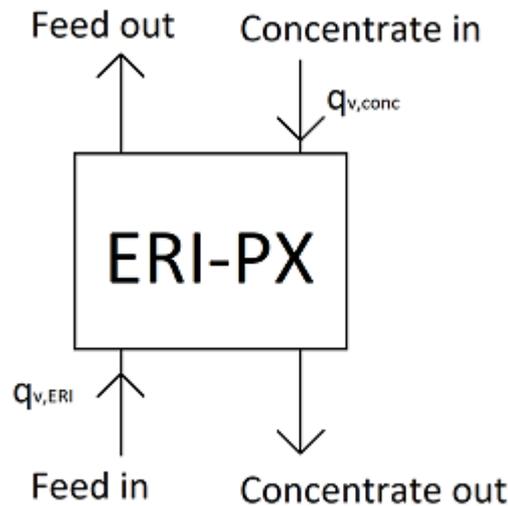


Figura 2-3. Esquema del funcionamiento del recuperador energético.

$$P_{W_{HPP'}}[kW] = (q_{v,Feed} - q_{v,ERD}) \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s}\right] \cdot (P_{Feed} - P_{ambiente})[bar] \cdot 100 \left[\frac{kPa}{bar}\right]$$

$$P_{W_{BP}}[kW] = q_{v,ERD} \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s}\right] \cdot (\Delta P_{lossRO} + HP_{DP})[bar] \cdot 100 \left[\frac{kPa}{bar}\right]$$

$$SEC_{neto} = \frac{P_{W_{HPP'}} + P_{W_{BP}}}{q_{v,Perm}} = 2.04 kWh/m^3$$

A este nuevo consumo específico de la planta desaladora se le va a sumar un consumo auxiliar de 1 MW correspondiente a la captación de agua de mar y la distribución del producto.

$$SEC_{TOTAL} = SEC_{SWRO} + SEC_{AUX} \approx 3 MW$$

Con este nuevo consumo específico y las condiciones del agua de mar de Australia, una planta de 8 MW de potencia puede producir un caudal de agua de 64000 m³/día. Para otras condiciones del agua de mar, la planta producirá un caudal distinto que podrá ser mayor o menor.

3. CONDICIONES ÓPTIMAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA MARINA

Se conoce que una central de energía marina debe estar en un emplazamiento que proporcione una amplitud de marea de mínimo 5 metros de altura para que la explotación de esta energía sea rentable económicamente. Desde ese punto de vista, se puede decir que Derby es uno de los lugares del planeta que mayor potencial de energía marina posee debido a la gran amplitud de sus mareas. La amplitud media a lo largo del año ronda los 7 metros de diferencia entre bajamar y pleamar.

En esta localización se tiene un proyecto en fase de construcción de una central mareomotriz, consistente en un ciclo simple (produce solo en una dirección) pero formada por dos cuencas, una superior y otra inferior. Esta variante permite que la producción de energía sea constante como se verá en los resultados obtenidos. El modo de operación de esta central será el siguiente: Durante la subida de la marea y siendo el nivel del mar superior al de la cuenca superior, las compuertas se abrirán para que la cuenca adopte el nivel máximo posible, al mismo tiempo que la cuenca inferior se llena por el traspaso de agua desde la cuenca superior a través de las turbinas para producir energía. En el momento en el que el nivel del mar y la cuenca superior vuelven a coincidir (ya en periodo de bajada de la marea), se cierran las compuertas de esta cuenca. Ahora ambas compuertas están cerradas, pero la producción de energía sigue efectuándose por ser el nivel de la cuenca inferior menor que el de la cuenca superior. Una vez la marea haya descendido lo suficiente para tener un nivel igual o menor al de la cuenca inferior, se abrirán las compuertas de esta cuenca para drenar, nuevamente sin parar de producir energía, dado que el nivel de la cuenca superior es mayor que el de la cuenca inferior. Cuando la marea comienza a subir de nuevo, las compuertas de la cuenca inferior se cierran y el nivel de esta empieza a aumentar por el paso de agua desde la cuenca superior a la inferior. Por último, se vuelve al punto de inicio, donde la marea sube y el nivel del mar supera al de la cuenca superior, momento en el que se abren las compuertas de esta cuenca que permite la entrada de agua.

A través de la Oficina de Meteorología del Gobierno de Australia, se ha obtenido un documento en el que se recoge la predicción de las mareas del año 2018, proporcionando información de la hora y altura de todas las pleamares y bajamares que se dan [11]. Con este documento se obtendrá el comportamiento del nivel del mar gráficamente.

Puesto que a lo largo de un año se dan, aproximadamente, unas 700 mareas, todas ellas distintas en alturas y horas, se realiza una aproximación quincenal, es decir, se va a obtener 24 días tipos para todo el año, correspondiendo cada uno de ellos a un periodo de 14-16 días, según la quincena del mes que corresponda.

A partir de esta aproximación será posible el estudio del nivel del mar y de las cuencas, así como la producción de energía, hora a hora, que se considerará similar en todos los días correspondientes a cada quincena.

Para la obtención de los días tipos se toman los datos de las mareas de cada quincena y se realiza una media tanto de las horas como de las alturas de los días que componen cada quincena, lo que nos proporciona una curva de valores medios.

De forma aproximada y siguiendo las pautas de la Figura 4 de variación del nivel de agua del Anexo G del documento de AECOM Australia Pty Ltd “Tidal Power Station”, se obtienen los niveles de los depósitos y la potencia máxima que proporciona en cada momento una turbina para todos los días tipos [4].

A continuación, se muestran gráficamente estos datos de los 24 días tipos obtenidos para el año 2018.

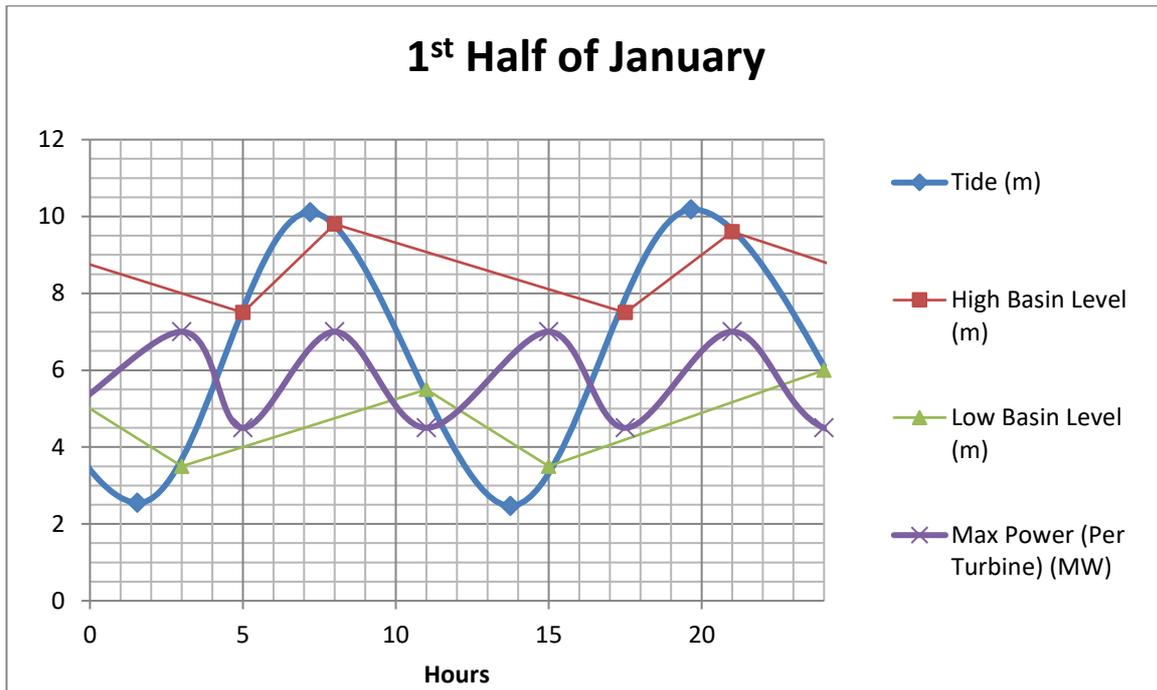


Figura 3-1. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de enero.

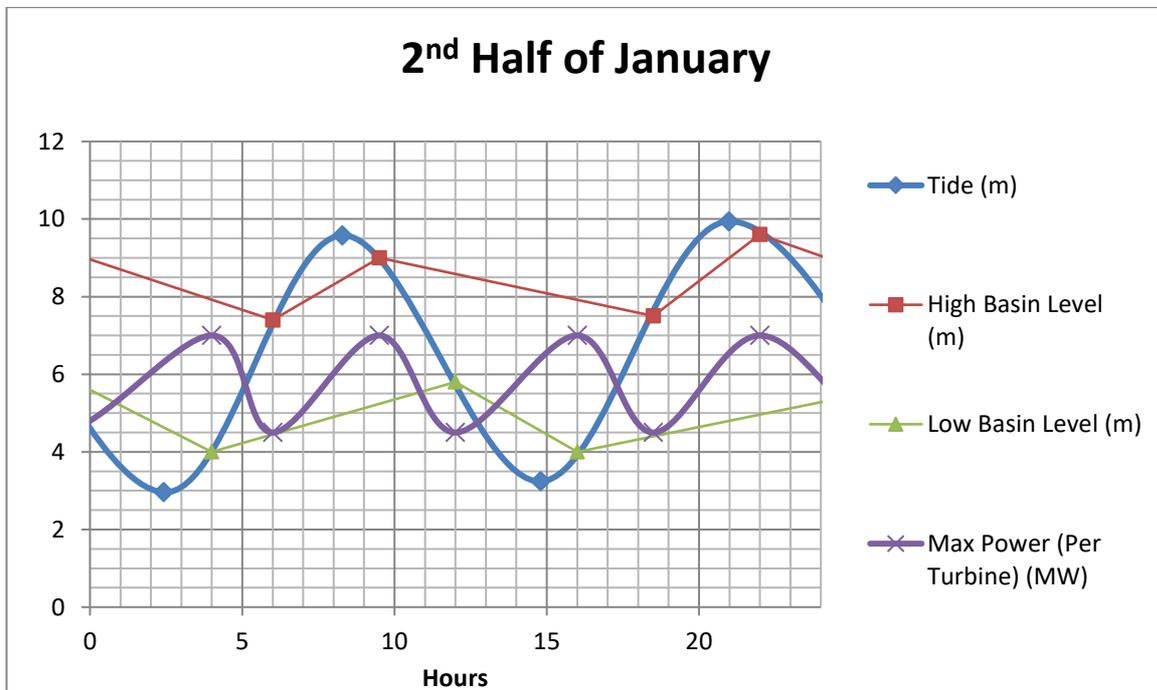


Figura 3-2. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de enero.

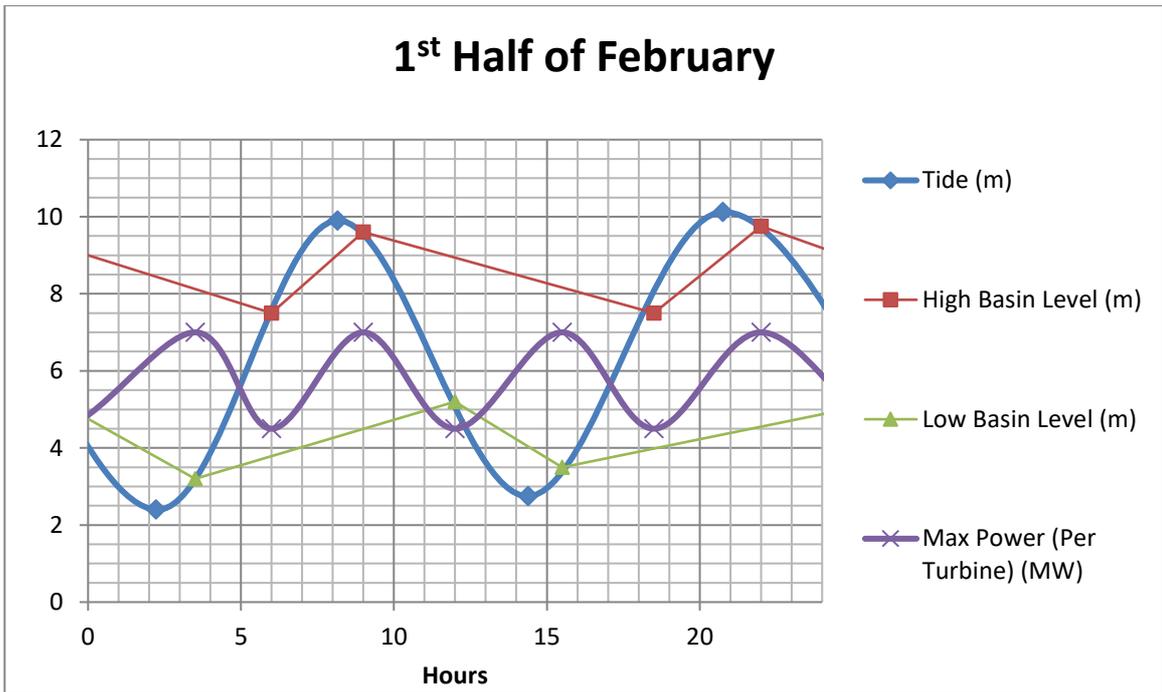


Figura 3-3. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de febrero.

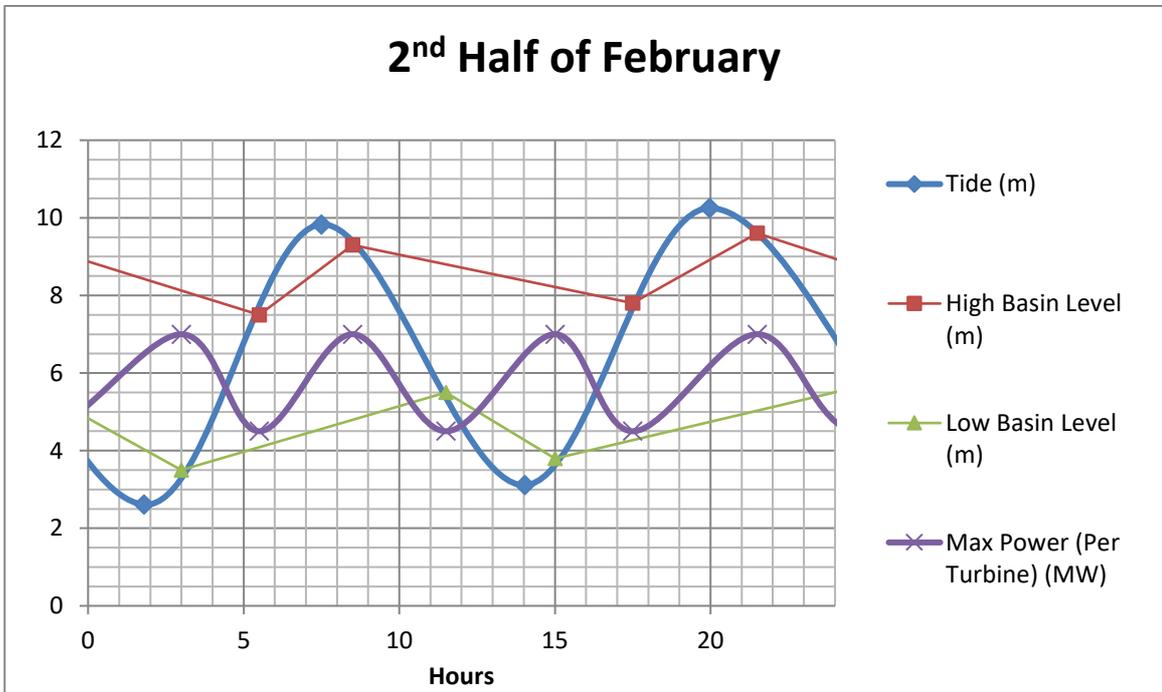


Figura 3-4. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de febrero.

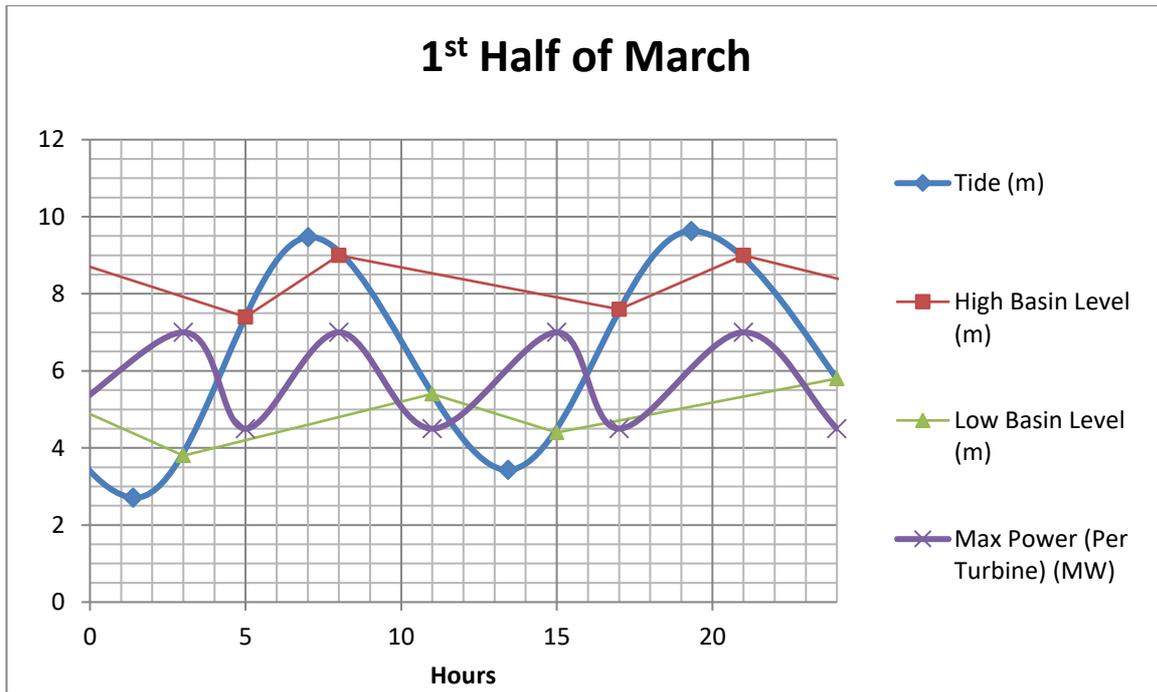


Figura 3-5. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de marzo.

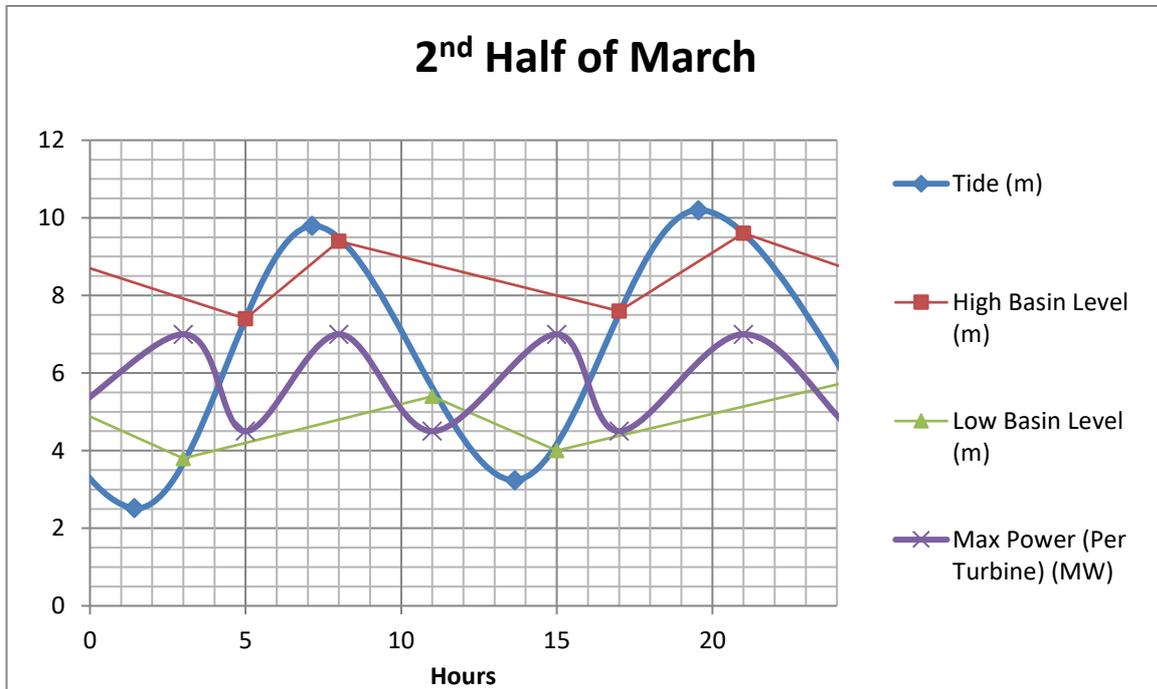


Figura 3-6. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de marzo.

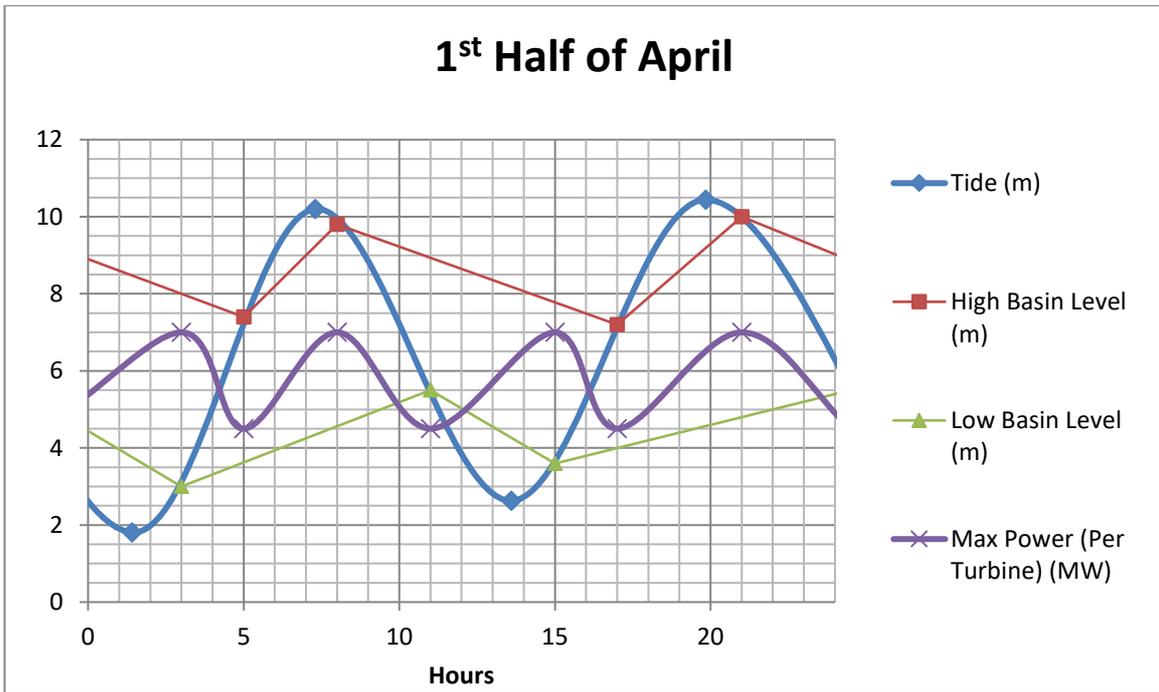


Figura 3-7. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de abril.

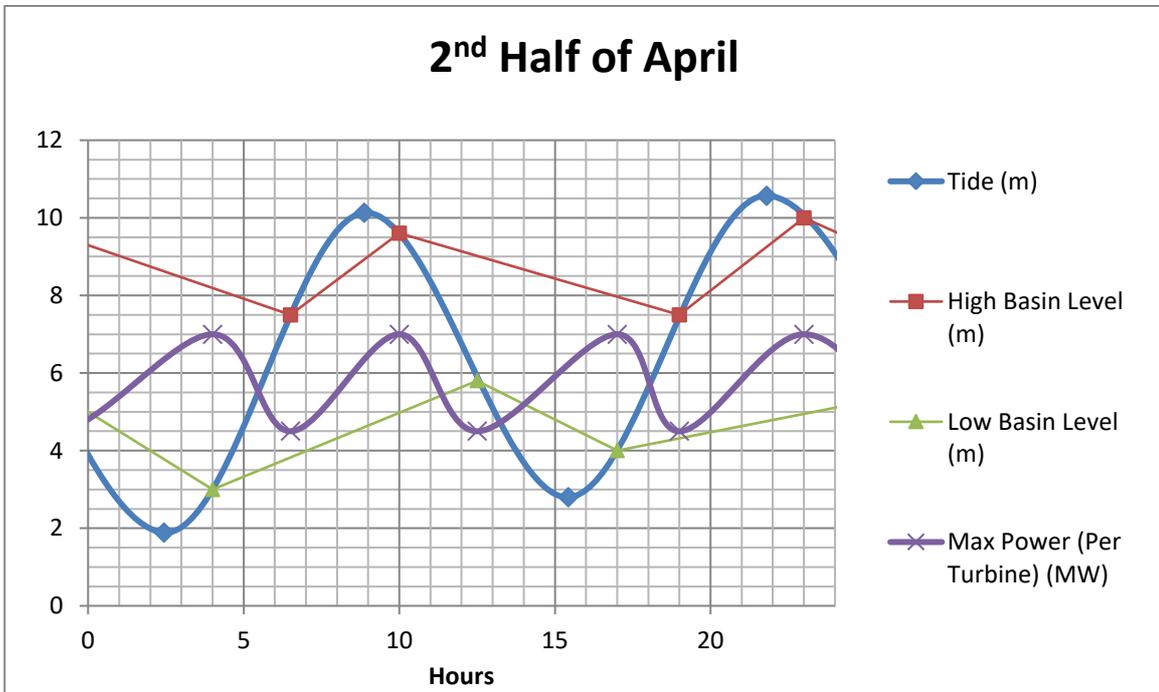


Figura 3-8. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de abril.

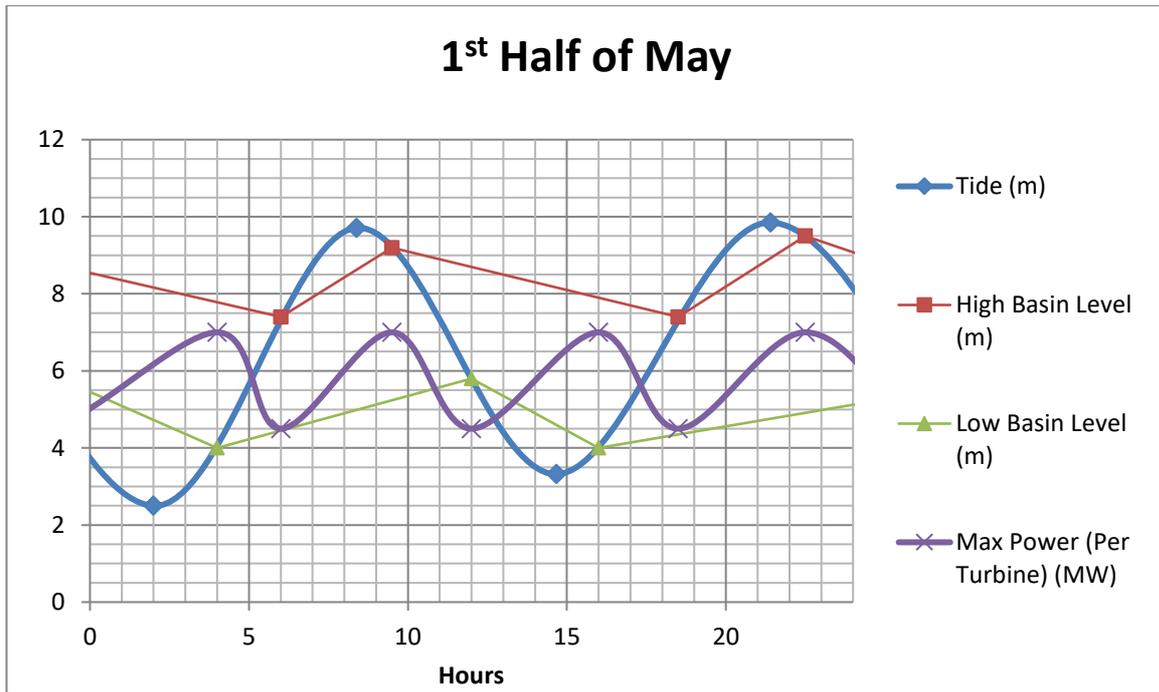


Figura 3-9. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de mayo.

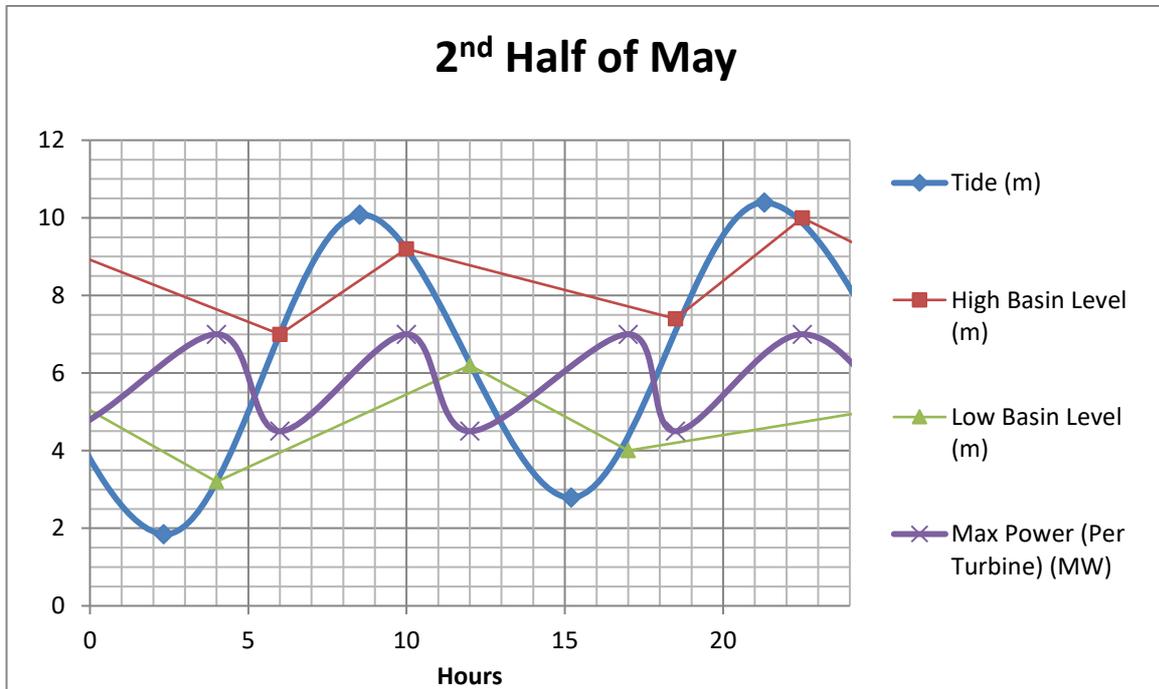


Figura 3-10. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de mayo.

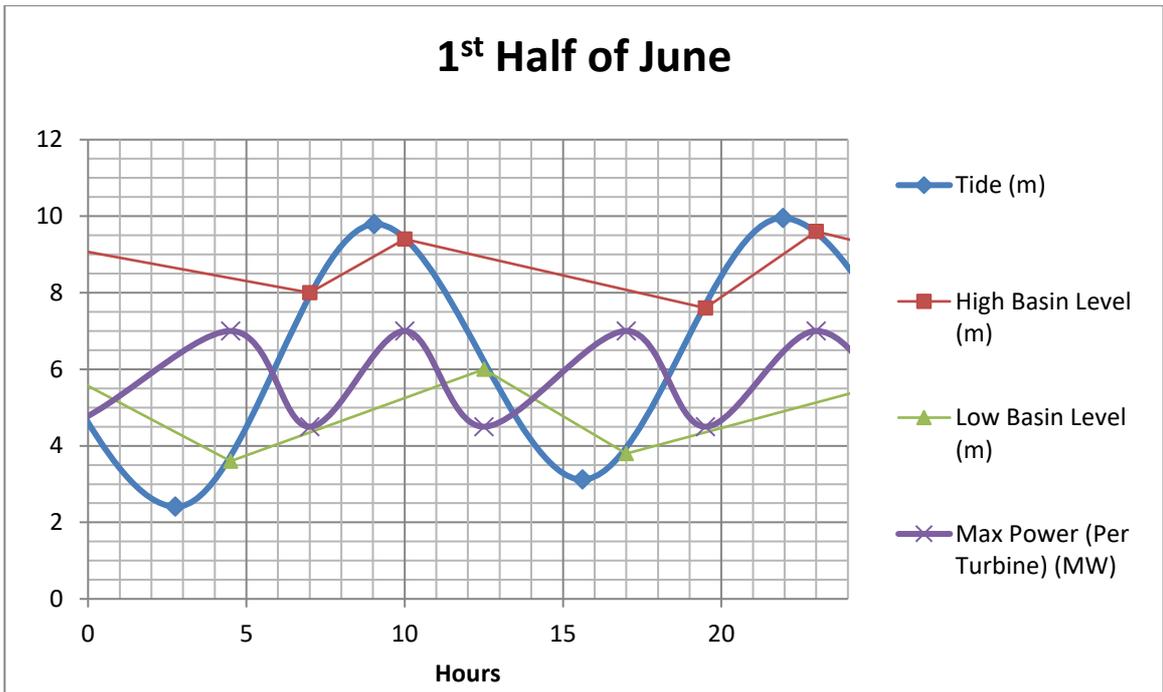


Figura 3-11. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de junio.

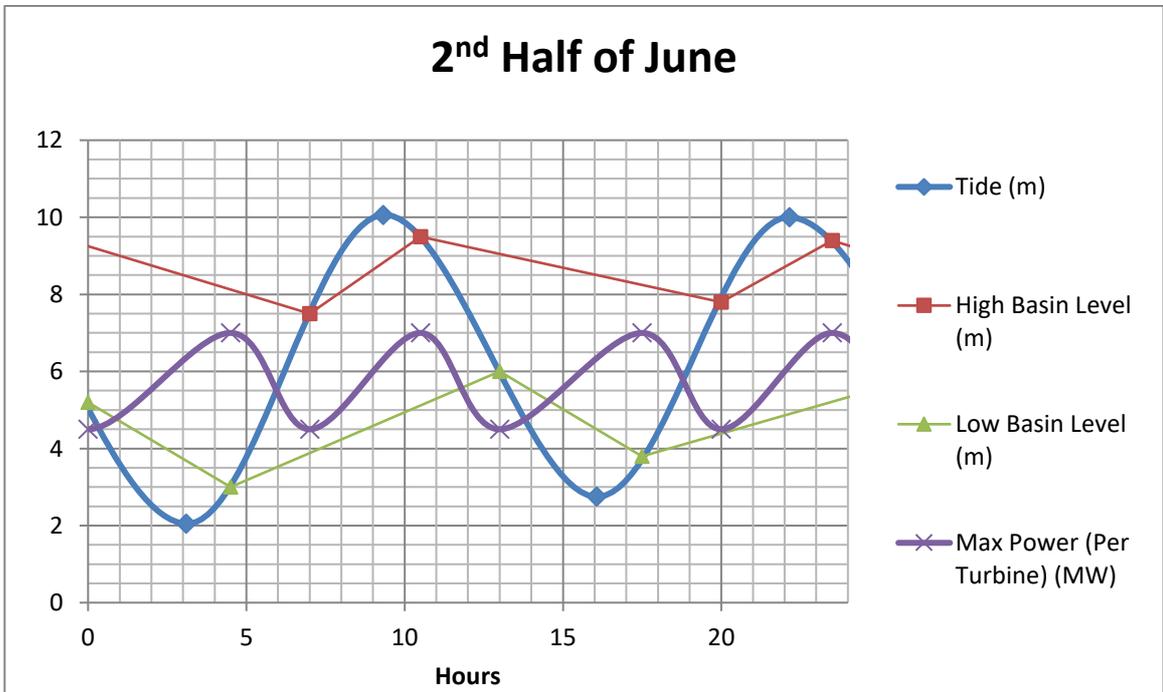


Figura 3-12. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de junio.

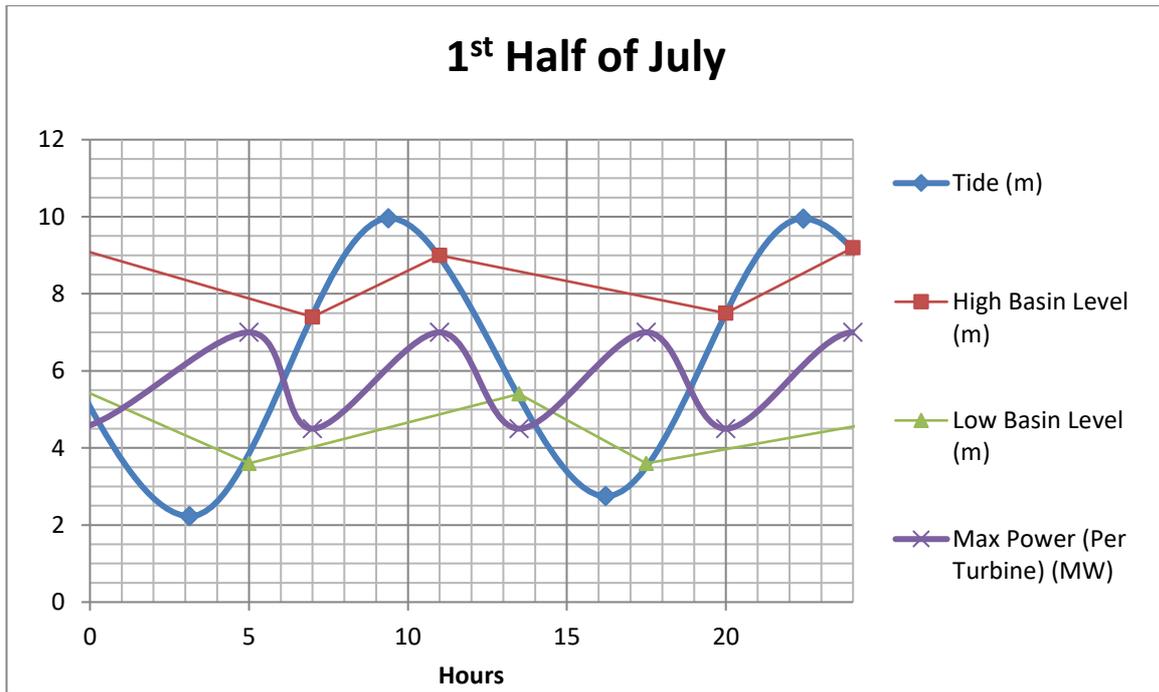


Figura 3-13. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de julio.

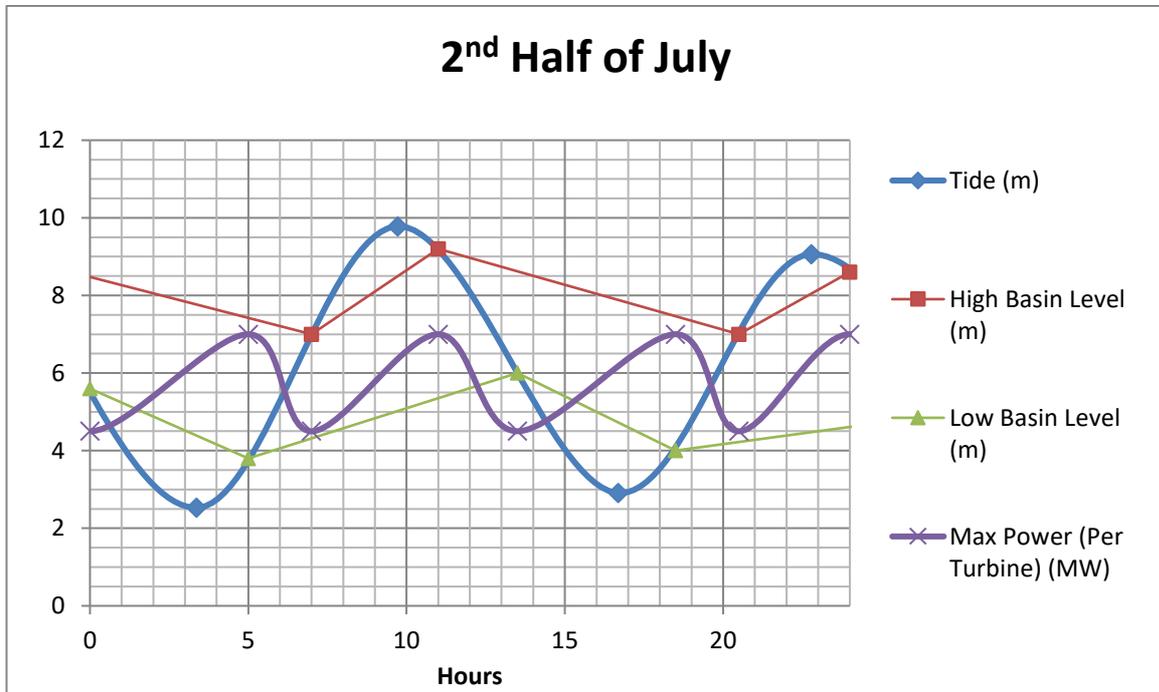


Figura 3-14. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de julio.

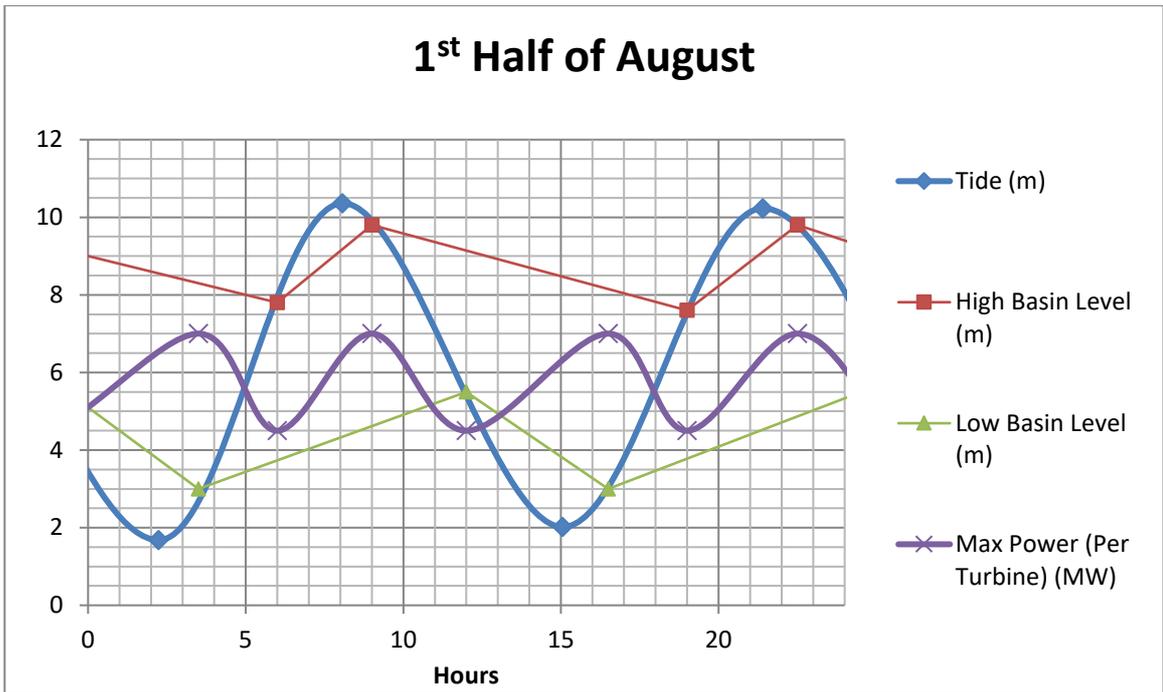


Figura 3-15. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de agosto.

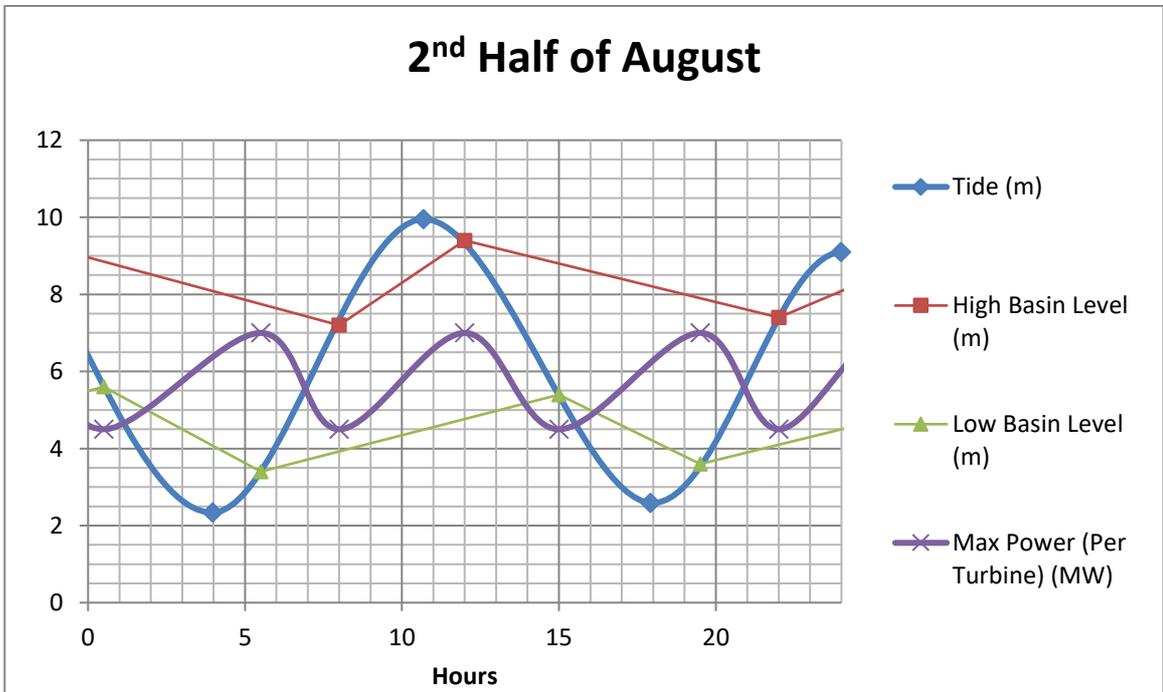


Figura 3-16. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de agosto.

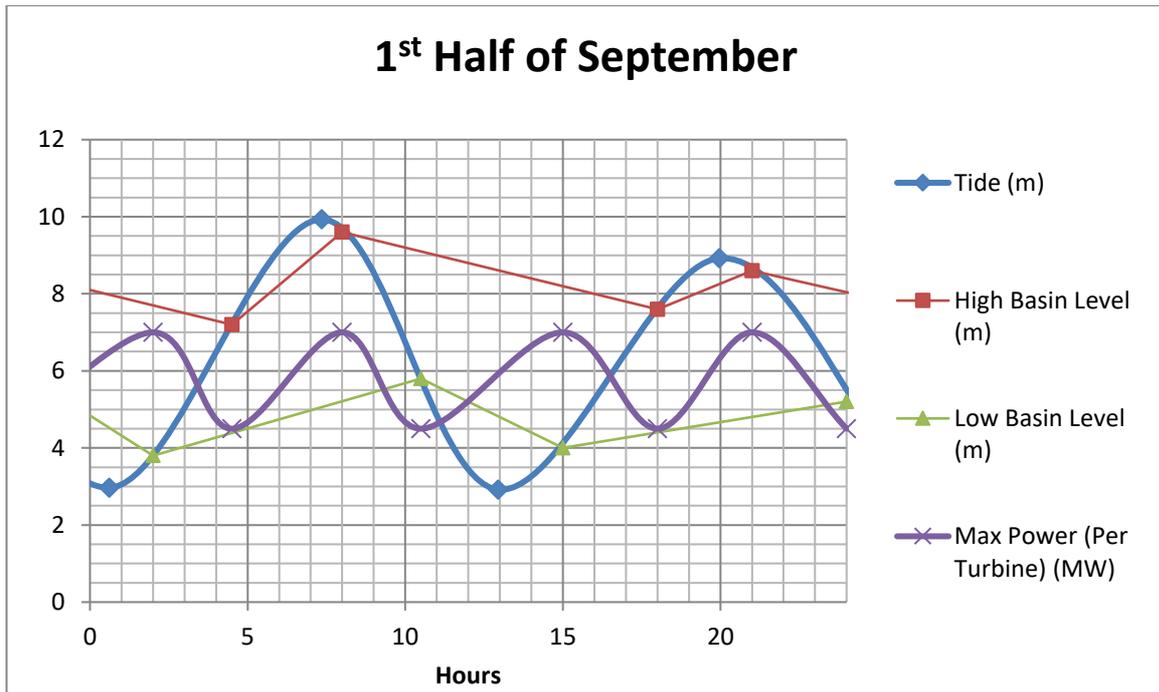


Figura 3-17. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de septiembre.

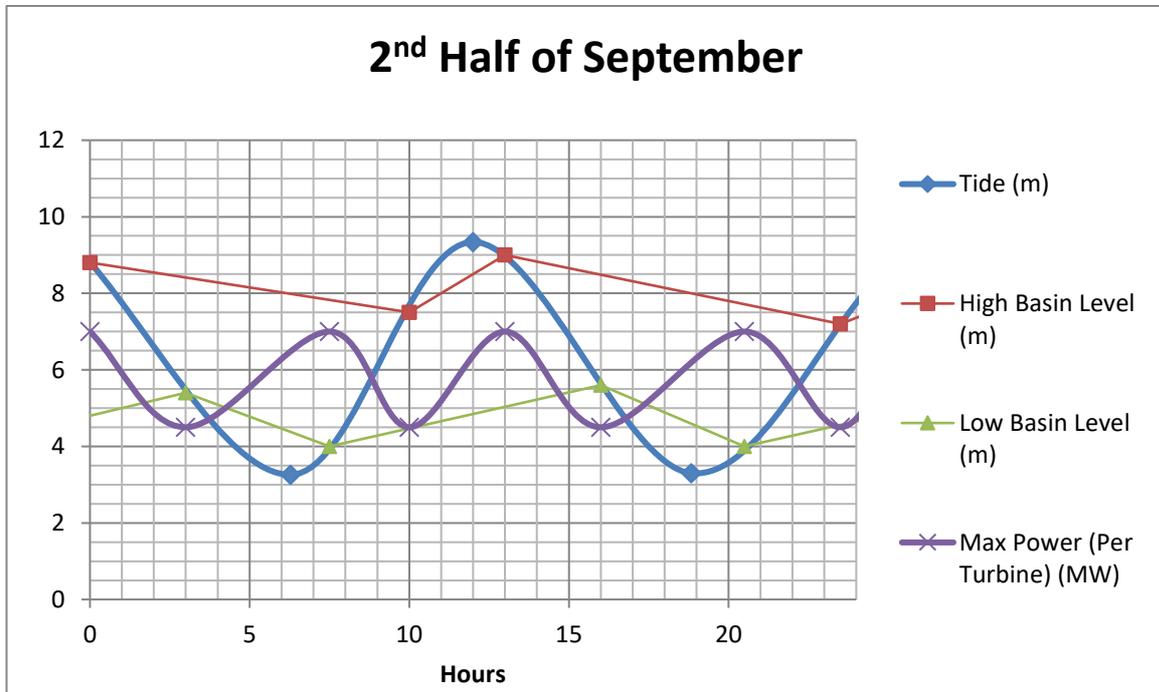


Figura 3-18. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de septiembre.

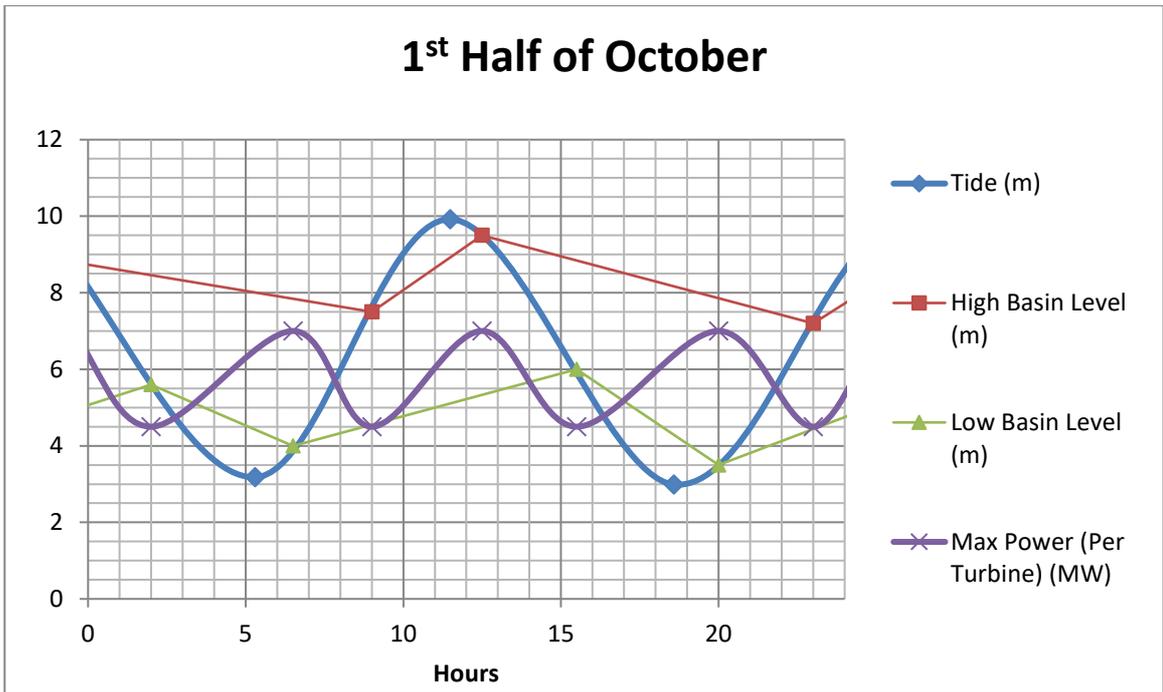


Figura 3-19. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de octubre.

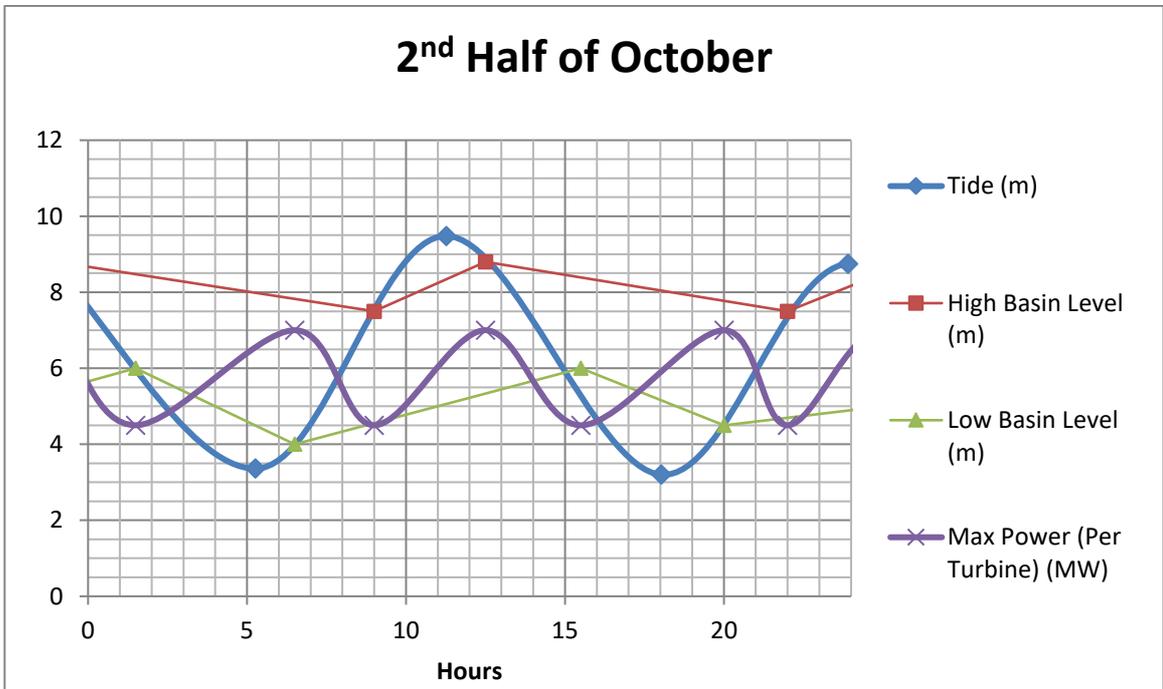


Figura 3-20. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de octubre.

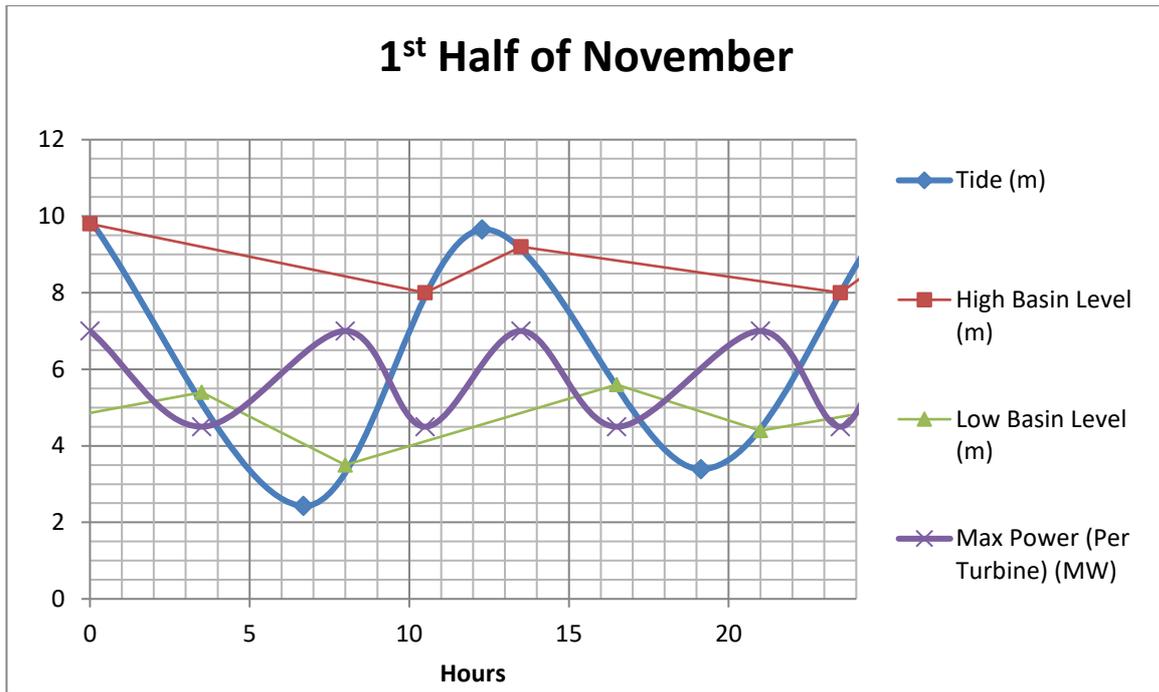


Figura 3-21. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de noviembre.

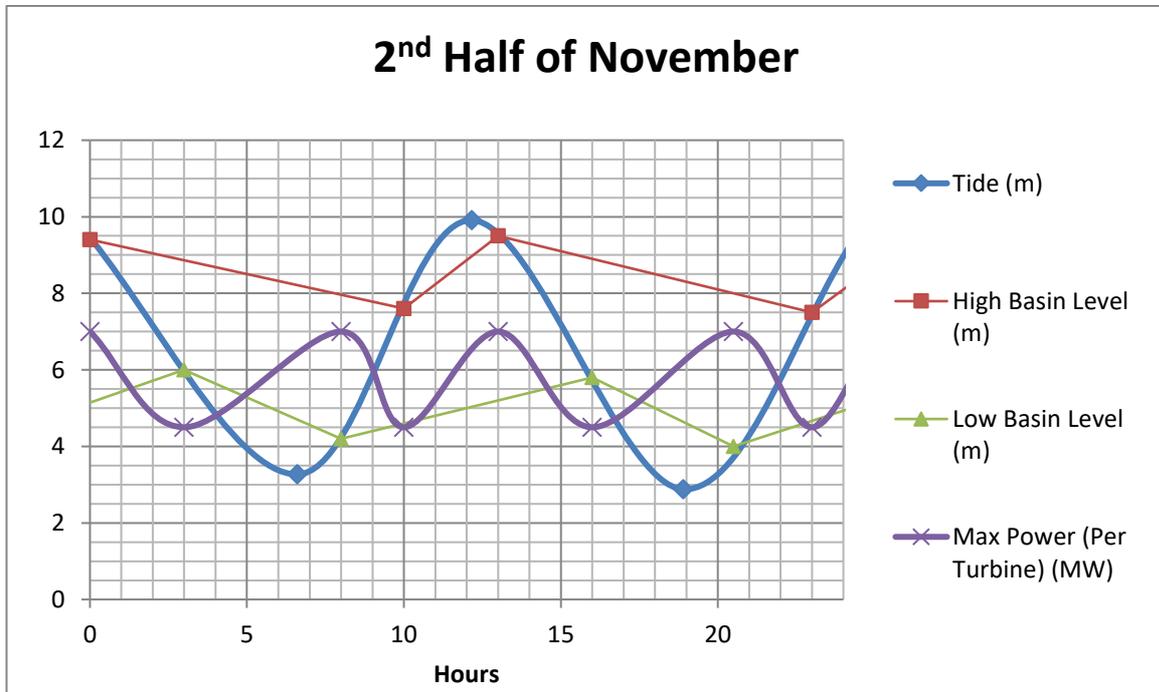


Figura 3-22. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de noviembre.

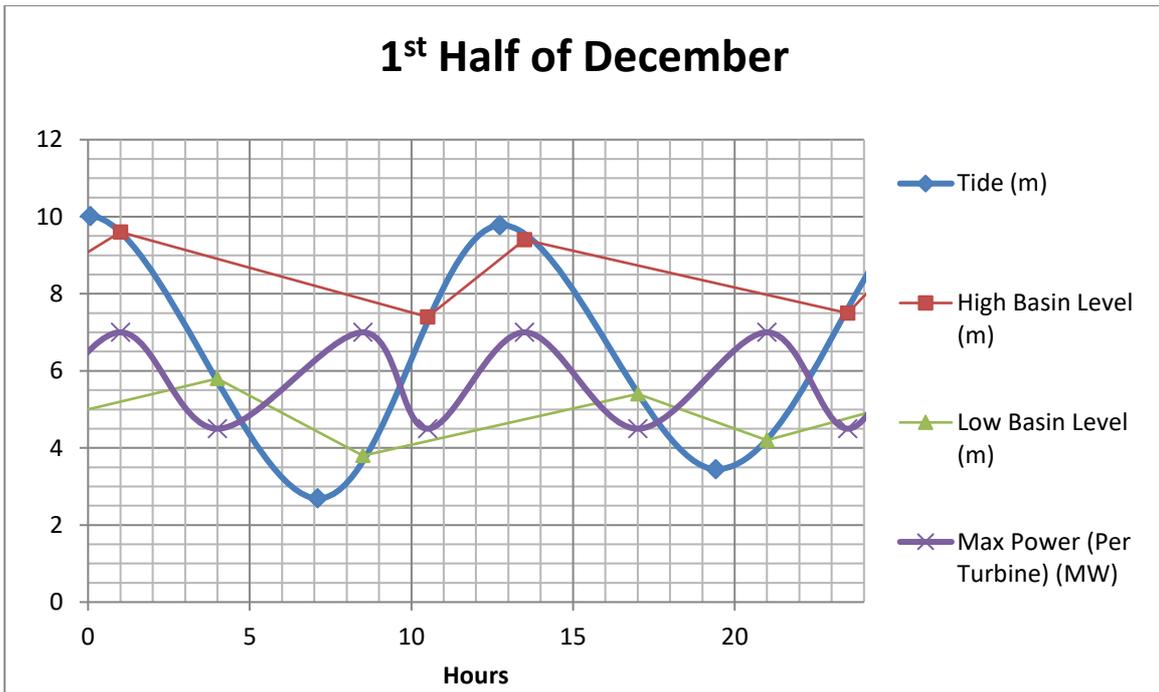


Figura 3-23. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la primera quincena de diciembre.

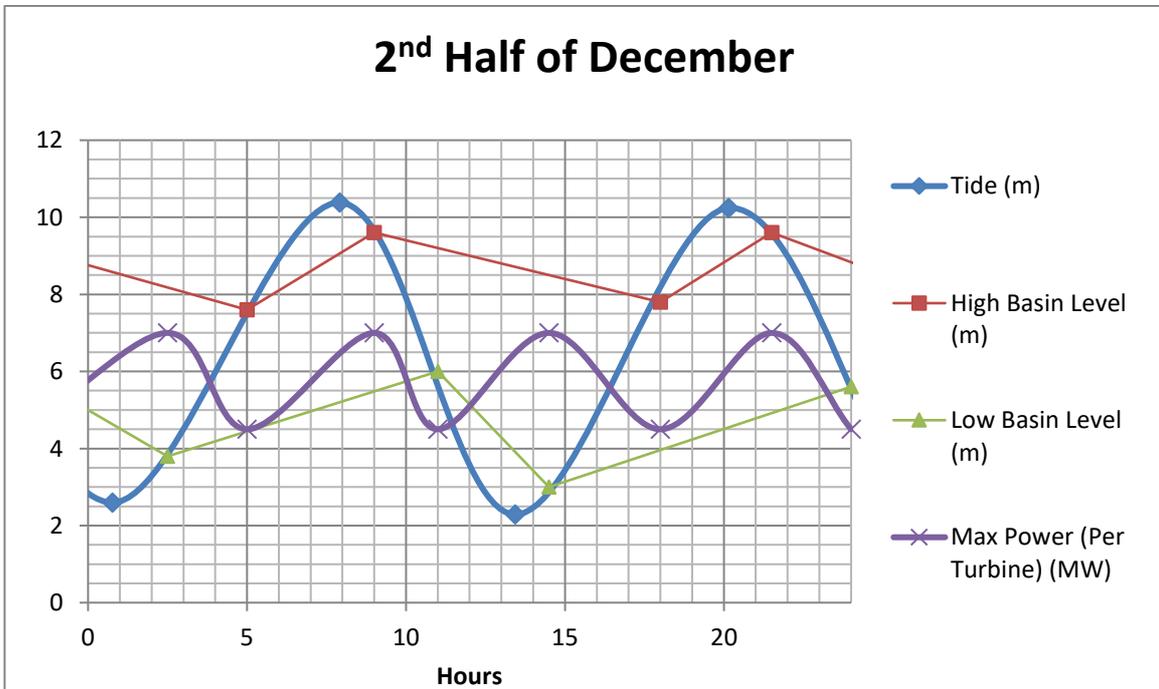


Figura 3-24. Variación del nivel de agua y potencia máxima de la segunda quincena de diciembre.

4. CONDICIONES ÓPTIMAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA

La desalación con energía eólica es la más rentable en comparación con otros sistemas de energía renovable. La forma más factible de usar el recurso eólico en esta aplicación es a través de la conversión de la energía eólica a energía eléctrica, puesto que es apto para plantas de mediana y/o gran escala.

El sistema que combina la planta de desalación de agua de mar por osmosis inversa (plantas SWRO) y el recurso eólico se divide en dos subsistemas principales:

- El primero de ellos es el subsistema de conversión de energía eólica, que se compone de:
 - o Turbinas eólicas que generan electricidad.
 - o Sistema de almacenamiento de energía.
 - o Conexión eléctrica entre la turbina eólica y el subsistema de osmosis inversa (RO).
 - o Equipo de electrónica de potencia, que controla el voltaje, la frecuencia y la potencia reactiva, y gestiona el flujo de potencia activa entre la turbina, el sistema de almacenamiento y el subsistema RO.
 - o Sistema de control, que regula el arranque y parada de los módulos RO y la carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía.
- El segundo subsistema es la planta SWRO que utiliza la energía generada en el primer subsistema.

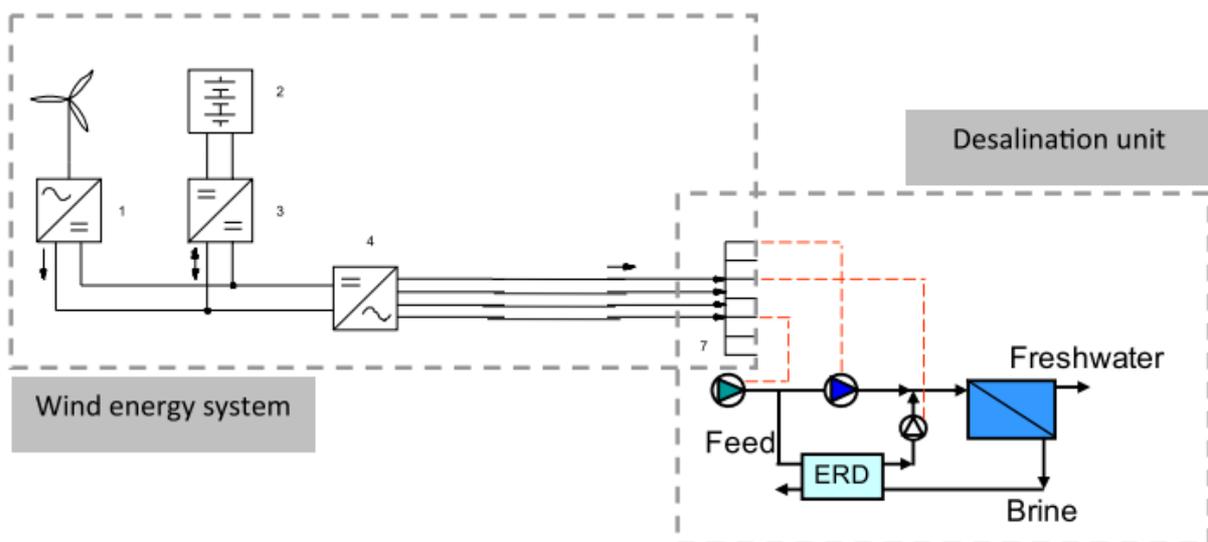


Figura 4-1. Esquema básico del sistema de energía eólica conectado a la planta de desalación.

Se va a realizar un análisis de dos plantas de desalación:

- La primera de ellas es una planta de capacidad fija (FC) de 1000 m³/día de producto y sólo opera cuando el recurso eólico es suficiente para suministrar toda la energía requerida por la planta.

- La segunda es una planta de capacidad gradual (GC) de 1000 m³/día dividida en tres bastidores, uno de 200 m³/día (bastidor 1) y dos de 400 m³/día (bastidores 2 y 3), todos independientes entre sí, que se conectan o desconectan dependiendo de la energía disponible.

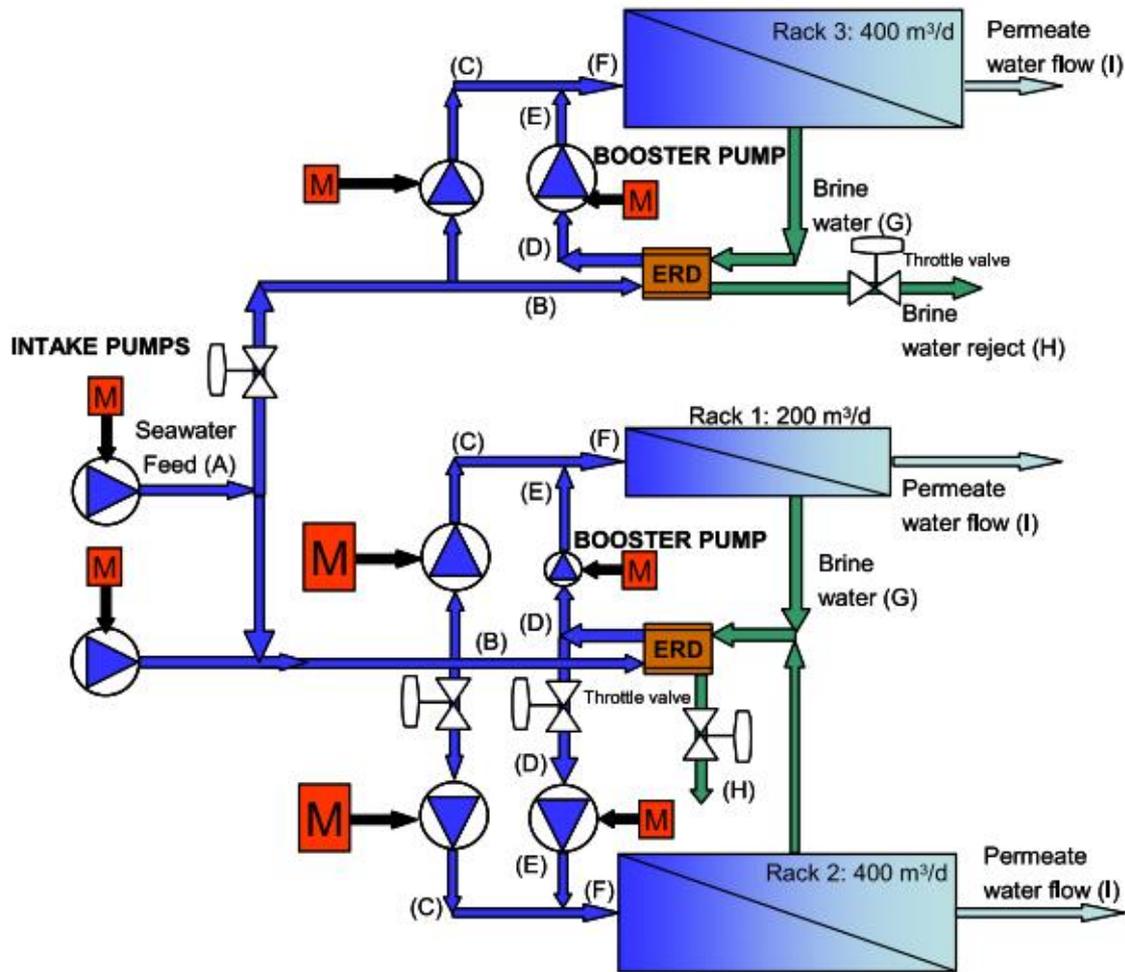


Figura 4-2. Diagrama de una planta desaladora de capacidad gradual

| | FC SWRO PLANT | | GC SWRO PLANT | | | Pressure (MPa) |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|-----------|-------------|----------------|
| | Volumetric flow (m ³ /d) | Pressure (MPa) | Volumetric flow (m ³ /d) | | | |
| | | | Train 1 | Train 1+2 | Train 1+2+3 | |
| Feed water intake (A) | 2500 | 0,25 | 571 | 1714 | 2857 | 0,25 |
| Product water (I) | 998 | 0,07 | 199 | 599 | 997 | 0,07 |
| Brine water (H) | 1502 | 0,1 | 372 | 1113 | 1864 | 0,1 |
| High-pressure pump outlet (C) | 1000 | 5,77 | 200 | 600 | 1000 | 5,66 |
| K-200 inlet (G) | 1496 | 5,57 | 370 | 1111 | 1852 | 5,38 |
| Booster pump inlet (D) | 1494 | 5,51 | 370 | 1110 | 1850 | 5,32 |
| Booster pump outlet (E) | 1494 | 5,77 | 370 | 1110 | 1850 | 5,66 |
| RO rack inlet (F) | 2494 | 5,74 | 370 | 1710 | 2850 | 5,63 |

Tabla 4-1. Parámetros de diseño de las plantas de desalación de capacidad fija y gradual

| | FC SWRO PLANT | GC SWRO PLANT | | |
|--|----------------------------------|---------------|-----------|-------------|
| | | Train 1 | Train 1+2 | Train 1+2+3 |
| Nº pressure vessels | 11 | 2 | 6 | 10 |
| Pressure vessel configuration | 2 SW30HRLE-400i + 5 SW30ULE-400i | | | |
| Nº elements | 77 | 14 | 42 | 70 |
| Total active membrane area (m ²) | 2861,32 | 520,84 | 1531,32 | 2601,80 |
| Average flux (L/m ² ·h) | 14,54 | 15,94 | 15,98 | 15,96 |
| Nº K-200 needed | 2 | 1 | 1 | 3 |
| Energy recovery efficiency | 0,98 | 0,98 | 0,97 | 0,97 |
| K-200 energy savings (kW) | 104 | 41,30 | 123,90 | 206,50 |
| High-pressure pump electrical power required (kW) | 70,2 | 14,50 | 43,50 | 72,50 |
| Booster pump electrical power required (kW) | 6,40 | 2,10 | 6,30 | 10,50 |
| Intake pump electrical power required (kW) | 35,40 | 8,10 | 24,30 | 40,50 |
| RO process specific energy consumption (kWh/m ³) | 1,93 | 1,99 | | |
| Total specific energy consumption (kWh/m ³) | 2,78 | 2,96 | 2,97 | 2,97 |

Tabla 4-2. Características del bloque RO de las plantas de desalación de capacidad fija y gradual

Una vez conocido el consumo de energía de ambas plantas de desalación (Tabla 4-3), se puede hacer el diseño del parque eólico. Se van a comparar tres tipos de turbinas eólicas, que serán FUHLANDER FL100 (100 kW), VESTAS V27 (225 kW) y ENERCON E32 (300 kW). Los valores de la Tabla 4-4 indican cómo se adapta la turbina eólica al emplazamiento. Un factor de capacidad adecuado debe ser superior a 0,4. Se observa que el generador de 100 kW se adapta mejor, pero produce menos energía que los otros dos propuestos.

| | Power Generation (kW) | | | Capacity factor | | |
|--------|-----------------------|--------|---------|-----------------|------|------|
| | FL100 | V27 | E32 | FL100 | V27 | E32 |
| Jan | 23,80 | 45,59 | 68,56 | 0,32 | 0,27 | 0,31 |
| Feb | 31,02 | 58,90 | 88,30 | 0,46 | 0,39 | 0,44 |
| Mar | 23,74 | 45,79 | 70,25 | 0,32 | 0,27 | 0,31 |
| Apr | 22,49 | 42,97 | 64,55 | 0,31 | 0,27 | 0,30 |
| May | 58,05 | 109,31 | 159,92 | 0,78 | 0,65 | 0,72 |
| Jun | 46,54 | 87,48 | 127,61 | 0,65 | 0,54 | 0,59 |
| Jul | 71,27 | 133,84 | 185,88 | 0,96 | 0,80 | 0,83 |
| Aug | 58,77 | 110,12 | 160,18 | 0,79 | 0,66 | 0,72 |
| Sep | 48,00 | 89,86 | 128,05 | 0,67 | 0,55 | 0,59 |
| Oct | 25,00 | 47,98 | 73,48 | 0,34 | 0,29 | 0,33 |
| Nov | 22,65 | 43,59 | 66,83 | 0,31 | 0,27 | 0,31 |
| Dec | 14,76 | 28,38 | 43,22 | 0,20 | 0,27 | 0,19 |
| Annual | 446,10 | 843,80 | 1236,83 | 0,51 | 0,43 | 0,47 |

Figura 4-3. Datos mensuales y anuales de potencia generada y factor de capacidad de los distintos aerogeneradores en estudio

De los tres aerogeneradores que se van a estudiar, se descarta en primer lugar la turbina FL100 puesto que, aunque presenta el mejor factor de capacidad de los tres, es el que menor cantidad de energía produce anualmente (Figura 4-3).

Para la planta de capacidad fija (FC), los dos aerogeneradores cubren mas del 50% de la capacidad máxima de producción de la planta. El aerogenerador E32 presenta valores de producción y cobertura mayores, pero el aumento de producción que se obtiene respecto al V27 no justifica que el coste de inversión sea mucho mayor, por lo que el V27 se puede considerar la mejor opción.

| | FC | | GC | |
|--|--------|---------|--------|---------|
| | V27 | E32 | V27 | E32 |
| Total water produced (m ³) | 230318 | 250865 | 223090 | 245540 |
| Annual average product volumetric flow (m ³ /d) | 631,01 | 687,3 | 611,21 | 672,71 |
| Total water non-produced (m ³) | 134035 | 113488 | 140899 | 118448 |
| Total plant operation hours (h) | 5688 | 6135 | 6844 | 7062 |
| Annual operation rate (%) | 65 | 70 | 78 | 81 |
| Total plant stop hours (h) | 3072 | 2625 | 1916 | 1698 |
| Energy produced by wind turbine (kWh) | 886511 | 1299430 | 886511 | 1299430 |
| Energy consumed by the desalination plant (kWh) | 620901 | 676008 | 660850 | 728179 |
| Excess energy (kWh) | 265610 | 623421 | 225661 | 571250 |
| Productivity ratio | 0,26 | 0,19 | 0,25 | 0,19 |

Tabla 4-4. Valores anuales de producción de agua para las turbinas V27 y E32.

La planta de desalación de capacidad fija permite la producción de una mayor cantidad de agua al año que la planta de capacidad gradual (GC produce 2-8% menos que FC), pero opera menos horas a lo largo del año. Esto implica que las tasas de operación anuales de la planta GC sean mayores y el exceso de energía menor, lo que conlleva a menores costes de inversión.

Para este proyecto, la planta desaladora que se analiza es de capacidad fija y el tipo de turbina elegida, según el estudio que se ha realizado en este punto, será la V27, por lo que se debe tener en cuenta las siguientes ratios [12]:

- Potencia instalada por unidad de capacidad de la planta: 0,225 kW/(m³/día).

$$225 \text{ kW} \rightarrow 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

- Factor de capacidad anual del aerogenerador: 0,43.
- Caudal de producción respecto capacidad de la planta: 0,631.

$$631 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} (\text{producido}) \rightarrow 1000 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} (\text{instalado})$$

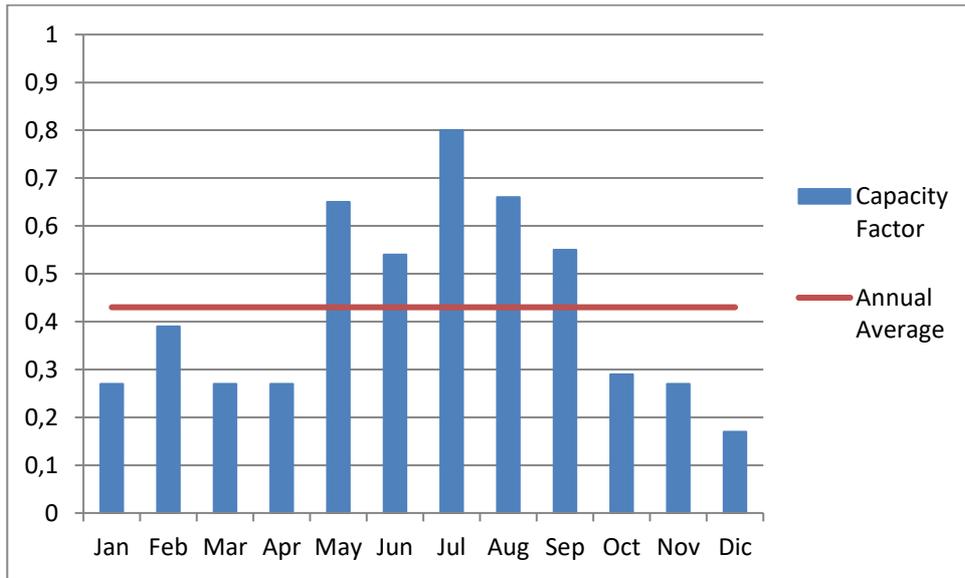


Figura 4-3. Factor de capacidad mensual y media anual del aerogenerador V27

5. HIBRIDACIÓN DE RECURSOS

La planta desaladora de 8 MW que se ha diseñado para el estudio estará abastecida por dos tipos de energía: eólica y mareomotriz. Como ya se ha explicado en el capítulo 3, la central mareomotriz tendrá instaladas 5 turbinas hidráulicas de 8 MW cada una, de las cuales, la producción de una de ellas estará destinada en su totalidad al abastecimiento energético de la planta desaladora.

Dadas las condiciones de las mareas, el funcionamiento de la central y las alturas adquiridas en las cuencas, la turbina tendrá una producción neta que varía entre 4,5 y 7 MW. La potencia que falta hasta los 8 MW que requiere la planta de desalación será proporcionada por un parque eólico de turbinas eólicas V27. Ésta potencia varía entre 1 y 3,5 MW, por lo que se realiza una instalación media, de modo que, a través de un almacenamiento, cuando el parque eólico produzca más energía de la demandada por la planta desaladora, esta energía sobrante puede almacenarse para ser utilizada en los momentos en los que la potencia proporcionada por el parque eólico sea insuficiente para cubrir la demanda. Para realizar el dimensionamiento del parque eólico se ha considerado la potencia eólica media requerida anualmente.

A continuación, se puede observar la cantidad de potencia que aporta cada recurso a la planta desaladora hora a hora a lo largo de un día. En este caso, los datos se corresponden al día tipo de la primera quincena de enero.

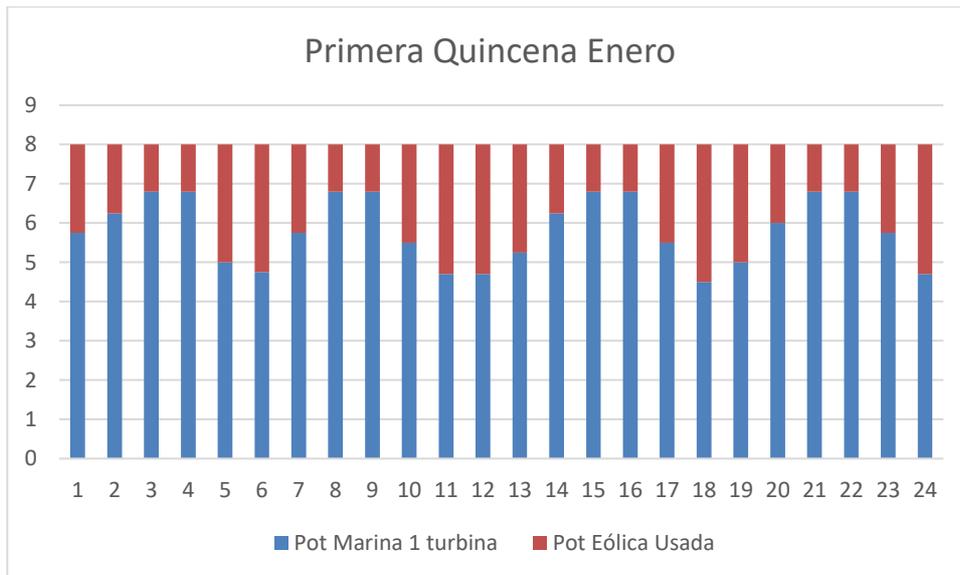


Figura 5-1. Potencia proporcionada por cada recurso a lo largo del día en la primera quincena de enero.

La media anual de la potencia aportada por el parque eólico es de 2,2 MW. Dado el factor de capacidad de la turbina eólica, la potencia instalada será mayor.

$$P_{w_{instalada}} = \frac{P_{w_{requerida}}}{Factor\ Capacidad} = 5,12\ MW$$

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realiza por último un estudio económico de la viabilidad de abastecer la planta desaladora a partir de la hibridación de ambos recursos y no únicamente con energía eólica como se realiza, por ejemplo, en las Islas Canarias.

La opción de hibridación consiste en la unión de la energía mareomotriz proveniente de una central de doble cuenca como la que se ha estudiado de Derby, en la cual, de las cinco turbinas de 8 MW de potencia, la potencia producida por una de ellas es destinada a la planta desaladora, y la energía eólica proveniente de un parque eólico de 5,12 MW. Para esta opción a estudiar, se tiene una planta desaladora de 64000 m³/día de capacidad.

Por otro lado, se tiene la opción en la que toda la energía requerida por la planta desaladora sea proporcionada únicamente por un parque eólico. Para este caso, se calcula el sobredimensionamiento que debe tener la planta desaladora por los posibles valles de producción que conllevan las energías renovables.

Se conoce que, cuando la planta se abastece únicamente con energía eólica, por cada 1000 m³/día de capacidad de la planta, se obtiene 631 m³/día de producto. Dado que la producción que se desea es de 64000 m³/día, la planta debe tener una capacidad de 104746 m³/día.

Así mismo, para 1000 m³/día de capacidad instalada (631 m³/día de producción), es necesario instalar 225 kW de potencia eólica, por lo que, para la producción de agua deseada, será necesario instalar 23,57 MW de turbinas eólicas.

6.1 Coste de la planta de desalación

A partir de un análisis económico realizado a una planta desaladora de 40000 m³/día de capacidad [8], se obtiene una ratio con el cual será posible aproximar el coste de una planta desaladora de cualquier otra capacidad.

En él se especifica el coste y porcentaje sobre el total de la inversión que va destinado a cada parte del proyecto de construcción, como se muestra a continuación:

| COSTES DIRECTOS DE LA CONSTRUCCIÓN | % | \$ | € |
|--|-----------|-----------------|-------------------|
| Preparación del sitio, caminos y estacionamiento | 1 | 580000 | 491525,424 |
| Cosumo | 4,8 | 2760000 | 2338983,05 |
| Pretratamiento | 8 | 4640000 | 3932203,39 |
| Equipo de sistema RO | 32 | 18560000 | 15728813,6 |
| Postoperatorio | 2 | 1160000 | 983050,847 |
| Eliminacion de concentrado | 2,5 | 1450000 | 1228813,56 |
| Manejo de residuos y sólidos | 1,5 | 870000 | 737288,136 |
| Sistemas electricos y de instrumentación | 2,2 | 1300000 | 1101694,92 |
| Equipos y servicios auxiliares y de servicio. | 2 | 1160000 | 983050,847 |
| Edificios | 3 | 1740000 | 1474576,27 |
| Puesta en marcha y aceptación | 2 | 1160000 | 983050,847 |
| TOTAL | 61 | 35380000 | 29983050,8 |

| COSTES INDIRECTOS DE LA CONSTRUCCIÓN | % | \$ | € |
|---|------------|-----------------|-------------------|
| SERVICIOS DE INGENIERÍA DE PROYECTOS | | | |
| Ingeniería preliminar | 1 | 580000 | 491525,424 |
| Prueba piloto | 1 | 580000 | 491525,424 |
| Diseño detallado | 5 | 2900000 | 2457627,12 |
| Gestión y supervisión de la construcción | 3 | 1740000 | 1474576,27 |
| TOTAL | 10 | 5800000 | 4915254,24 |
| DESARROLLO DEL PROYECTO | | | |
| Administración, contratación y gestión | 2 | 1160000 | 983050,847 |
| Permisos ambientales | 4,5 | 2610000 | 2211864,41 |
| Servicios jurídicos | 1,5 | 870000 | 737288,136 |
| TOTAL | 8 | 4640000 | 3932203,39 |
| COSTES FINANCIEROS DEL PROYECTO | | | |
| Interés durante la construcción | 2 | 1160000 | 983050,847 |
| Fondo de reserva de servicio de la deuda | 5 | 2900000 | 2457627,12 |
| Otros costes financieros | 4 | 2320000 | 1966101,69 |
| TOTAL | 11 | 6380000 | 5406779,66 |
| CONTINGENCIAS | | | |
| TOTAL | 10 | 5800000 | 4915254,24 |
| COSTE DE LA CONSTRUCCION TOTAL | 100 | 58000000 | 49152542,4 |

Tabla 6-1. Coste de la construcción de una planta desaladora de 40000 m³/día de capacidad

Por lo tanto, por cada m³/día de capacidad de la planta de desalación se va a tener un coste de inversión de, aproximadamente, 1230 €.

6.2 Coste del parque eólico

Mediante la Asociación Danesa de la Industria Eólica se obtiene el coste que conlleva la instalación de un parque eólico. De ella se puede extraer un coste promedio de 1000 \$ por cada kW instalado.

Puede conocerse también el coste de un aerogenerador según la potencia de éste. En este caso, para el estudio de este proyecto, se han elegido aerogeneradores de 225 kW, lo que supone un coste por aerogenerador de 200000 \$ (172562 €) [13].

A partir de estos datos se puede obtener una ratio de coste por unidad de potencia para poder calcular el coste de la instalación de un parque eólico de cualquier otra potencia compuesto por aerogeneradores de 225 kW.

Coste del kW de potencia eólica instalada: 766,94 €/kW.

6.3 Comparación de costes

A continuación, se va a realizar un estudio económico comparativo de los dos tipos de sistemas mencionados anteriormente. En la siguiente tabla (Tabla 6-2) se muestra un resumen de estos dos sistemas y el coste de cada parte y total de cada uno de estos sistemas.

El sistema híbrido será la base de la comparación, es decir, se va a calcular el sobre coste del sistema de abastecimiento energético sólo con eólica respecto al sistema híbrido.

| | | Capacidad planta desaladora (m3/día) | Potencia instalada marina (kW) | Potencia instalada eólica (kW) |
|---------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Ratio Coste (€/ud.) | | 1230 | - | 766,94 |
| Sist. Híbrido | Valor (ud.) | 64000 | 8000 | 5120 |
| | Coste (€) | 78720000 | - | 3926732,8 |
| Sist. Sólo Eólica | Valor (ud.) | 104746 | 0 | 23570 |
| | Coste (€) | 128837580 | - | 18076775,8 |
| Sobre coste (€) | | 50117580 | - | 14150043 |

Tabla 6-2. Características y coste de los dos sistemas en estudio

El sobre coste total que conlleva el sobredimensionado de la planta desaladora y del parque eólico se cuantifica en mas de 64 millones de euros. Por tanto, esa cantidad podría utilizarse en sobredimensionar en 8 MW una central marina de las características descritas. Costes de hasta un máximo de 8 M€/MW instalado harían viable el proyecto. Cabe además destacar que la operación discontinua de una planta de desalación alimentada exclusivamente por energía eólica se traduce en incrementos en el coste de operación y mantenimiento.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado el estudio innovador de plantas de desalación de agua de mar eólicas con respaldo energético de energía marina, en particular de instalaciones de aprovechamiento de las mareas. Del estudio realizado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Una vez analizadas las características de las plantas de aprovechamiento de energía de las mareas, se ha seleccionado como tipo de planta idóneo un proyecto en construcción en Derby, Australia. El proyecto consta de 5 turbinas de potencia nominal 8 MW cada una, colocadas entre dos cuencas cuyos niveles dependen del nivel del mar. Se diferencia entre cuenca superior e inferior, haciendo que el agua atraviese las turbinas para la generación energética desde la superior a la inferior. Las mareas cambian su horario a lo largo del año, pero el hecho de que sea un fenómeno predecible facilita el aprovechamiento de la energía que se produce a partir de ella. Este método de funcionamiento de la central a través de dos cuencas permite que la producción sea ininterrumpida las 24 horas del día, todos los días del año, con una variación en la producción que va desde los 4,5 MW a los 7 MW de potencia que depende de la diferencia de alturas entre las dos cuencas en cada momento.
2. El aporte marino considerado para la planta de desalación es la producción de una única turbina de potencia nominal de 8 MW. Podríamos tener ese aporte energético formando parte de una central marina de gran tamaño, que se sobredimensiona con una turbina adicional. Si tuviese sentido por los costes de inversión, podría optarse también por la construcción de una instalación marina de 8 MW.
3. Se recomienda que no sea la energía marina el respaldo de la energía eólica, sino justo lo contrario, dado que es posible la producción energética marina continua a lo largo del año, aunque de potencia variable.
4. Como ejemplo, una planta desaladora que demanda 8 MW en Australia tendría una capacidad nominal de 64000 m³/día. El dimensionamiento energético sería: una turbina hidráulica de 8 MW nominales y un parque eólico de 5,12 MW. Situadas en lugares muy favorables podría lograrse la operación de la planta desaladora con mínimas paradas a lo largo del año, que se aprovecharían para labores de reposición de membranas y mantenimiento. Debe además considerarse que es relativamente económico el almacenamiento de agua producto.
5. Se han cuantificado el ahorro económico que supondría pasar de un buen factor de capacidad de una planta desaladora eólica a la operación continua de dicha planta desaladora mediante el sistema híbrido de alimentación energética. El ahorro es del orden de 64 M€, que puede invertirse en el sobredimensionamiento de 8 MW de una central marina ya existente o en proyecto o en la inversión de la construcción de una central de 8 MW.
6. Como datos globales, en buenos emplazamientos se propone que por cada 1000 m³/día de demanda, se instalen 125 kW de energía marina y 80 kW de energía eólica. Un estudio detallado quincena a quincena nos proporcionaría un dato aproximado del factor de capacidad de la planta de desalación. Si no se logra la operación continua habría que recurrir a un cierto sobredimensionamiento de la planta de desalación para alcanzar la demanda. Este análisis detallado nos permitiría tomar la decisión sobre el almacenamiento energético recomendado en el parque eólico.
7. Se propone como trabajo futuro localizar emplazamientos en el mundo donde se den en la misma región la demanda de agua desalada y las condiciones óptimas para la explotación de ambos recursos energéticos, marinos y eólicos.

REFERENCIAS

- [1] López Herrera, J.M. Apuntes de la asignatura “Energía hidráulica y marina”. Grado en Ingeniería de la Energía. ETSI, Universidad de Sevilla, curso 2017-18.
- [2] Vega de Kuyper, J.C. y Ramírez Morales, S. (2014). *Fuentes de energía renovables y no renovables: aplicaciones*. Barcelona: Marcombo.
- [3] Carte González, J.A., Calero Pérez, R., Colmenar Sants, A. y Castro Gil, M.A. (2009). *Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson-Prentice Hall, D.L.
- [4] AECOM Australia Pty Ltd. <http://tidalenergyaustralia.com/page2.htm> (Junio, 2018) “Environmental Impact Statement - Derby Tidal Power Station 2010/5544”.
- [5] Adopted, F., Commission, E., & No, D. (2016). CROSS BORDER COOPERATION WITHIN THE EUROPEAN NEIGHBOURHOOD INSTRUMENT (ENI) MEDITERRANEAN Adopted by the European Commission on 17 December 2015 Decision No C (2015) 9133 Table of contents, (C), 1–171.
- [6] Información de la ciudad de Derby. <http://es.db-city.com/Australia--Australia-Occidental--Derby> (Junio, 2018).
- [7] Saliby, I. El, Okour, Y., Shon, H. K., Kandasamy, J., & Kim, I. S. (2009). Desalination plants in Australia, review and facts. *Desalination*, 247(1–3), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.12.007>
- [8] Wilf, M., *The Guidebook to Membrane Desalination Technology. Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems Process, Design, Applications and Economics*. Balaban Desalination Publications, 2007. ISBN 0-86689-065-3.
- [9] Energy Recovery. <http://www.energyrecovery.com/> (Febrero, 2009) Doc nº 80074-01. “ERI technical Bulletin from PX Arrays”.
- [10] García Rodríguez, L. Apuntes de la asignatura “Diseño eficiente en instalaciones de desalación de agua”. Master universitario en Sistemas de Energía Térmica. ETSI, Universidad de Sevilla, curso 2017-18.
- [11] Australian Government. http://www.bom.gov.au/ntc/IDO59001/IDO59001_2018_WA_TP043.pdf (Junio, 2018) “Times and Heights of High and Low Waters”.
- [12] Peñate, B., Castellano, F., Bello, A., & García-rodríguez, L. (n.d.). Assessment of a stand-alone gradual capacity reverse osmosis desalination plant to adapt to wind power availability : A case study. *Energy*, nº de volumen, año, pp. pág inicia-pág final. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.005>
- [13] Danish Wind Industry Association <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/econ/econ.htm> (Junio, 2018) Programa de cálculo económico en aerogeneradores.

