

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA  
INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

*SOLUCIÓN EÓLICA DE GENERACIÓN  
HIDRÁULICA VÍA AIRE HÚMEDO*

**Alumno:** Martínez Gorroño, Álvaro

**Director:** Arriaga Bayo, Pedro

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** Bilbao, 17 de julio de 2018

## Solución eólica de generación hidráulica vía aire húmedo

## Tabla de contenido

<b>1. Resumen, Laburpena, Abstract</b> .....	5
1.1. Resumen .....	5
1.2. Laburpena.....	6
1.3. Abstract .....	7
<b>2. Listas</b> .....	8
2.1. Lista de tablas.....	8
2.2. Lista de ilustraciones .....	9
2.3. Lista de acrónimos .....	10
<b>3. Introducción</b> .....	11
<b>4. Contexto</b> .....	12
4.1. Características físicas y naturales de Egipto y Zafarana .....	15
4.2. El parque eólico.....	17
<b>5. Alcance y objetivos</b> .....	19
<b>6. Acercamiento teórico</b> .....	20
6.1. Psicrometría.....	20
6.1.1. Entalpía del aire húmedo.....	20
6.1.2. Humedad específica .....	21
6.1.3. Humedad relativa .....	22
6.1.4. Diagrama (i-w) del aire húmedo (Diagrama de Mollier) .....	24
6.2. Aprovechamiento de la energía eólica .....	27
6.2.1. Rugosidad y cizallamiento del viento .....	29
6.3. Velocidad del viento a diferentes alturas .....	31
6.4. Potencia del viento .....	32
6.4.1. Potencia eólica aprovechable .....	32
6.4.2. Potencia eólica aprovechable a diferentes alturas .....	32
<b>7. Beneficios del proyecto</b> .....	33
<b>8. Análisis de alternativas</b> .....	34
8.1. Metodología .....	34
8.1.1. Método de extracción de agua mediante enfriamiento.....	34
8.1.2. Método de extracción mediante compresión.....	38
8.2. Cálculos.....	41
8.2.1. Enfriamiento.....	41
8.2.2. Sistema de extracción de agua mediante compresión .....	49

<b>9. Selección de la solución .....</b>	<b>57</b>
9.1. Aerogeneradores Gamesa “G80-2.0” .....	57
9.2. Datos turbina G80/2000 .....	57
9.3. Componentes de la instalación del proceso de enfriamiento.....	59
9.4. Componente principal de la instalación de extracción de agua mediante la compresión	65
<b>10. Análisis de viabilidad técnica .....</b>	<b>70</b>
<b>11. Descripción de las tareas Gantt.....</b>	<b>73</b>
<b>12. Presupuesto .....</b>	<b>74</b>
<b>13. Análisis de riesgos.....</b>	<b>77</b>
13.1. Identificación de los riesgos .....	77
13.2. Evaluar la probabilidad de cada factor de riesgo .....	77
13.3. Evaluar el impacto de cada factor de riesgo.....	78
13.4. Priorizar los riesgos.....	79
13.5. Desarrollar la respuesta .....	79
<b>14. Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>15. Bibliografía .....</b>	<b>84</b>
<b>16. Anexo I: Planos de conjunto. Esquemas y fichas técnicas.....</b>	<b>87</b>
<b>17. Anexo II: Directrices de la OMS para la calidad del agua potable .....</b>	<b>89</b>

# **1. Resumen, Laburpena, Abstract**

## **1.1. Resumen**

El objeto de este trabajo es analizar diferentes alternativas para obtener agua del aire atmosférico; como novedad, se propone un sistema de compresión del aire húmedo que se encuentra en el ambiente. Éste se implantará a un aerogenerador, aprovechando la energía del viento para ponerlo en funcionamiento.

Estos sistemas serán evaluados para un teórico punto de operación en la costa del Mar Rojo en el norte de África, concretamente en el desierto de Zafarana.

En primer lugar, se realizará un acercamiento teórico sobre la materia que se recomienda conocer para entender de la mejor forma posible los cálculos y explicaciones que aparecerán a lo largo del documento.

A continuación, se procede a realizar una comparación tanto de la cantidad de agua extraída como de la energía necesaria para llevar a cabo dicho procedimiento, con otras tecnologías ya implantadas a nivel comercial para el mismo propósito. Además, se describirán los componentes más significativos del sistema más extendido como es el de enfriamiento y se expondrán una serie de opciones para poner en marcha la alternativa propuesta.

Con el fin de poner en contexto esta tecnología, se considerará información acerca del parque eólico donde se ha pensado esta propuesta alternativa, así como de los aerogeneradores dispuestos en dicho parque.

Por último, se explicarán las tareas que han sido necesarias para abordar este documento, una partida de presupuesto, un análisis de viabilidad técnica y un análisis de riesgos aplicados a dicho proyecto.

## 1.2. Laburpena

Lan honen helburu nagusia ura atmosferako airetik lortzeko dauden aukerak aztertzea da. Berritasun gisa, ingurunean dagoen aire hezea konprimatzeko sistema bat proposatzen da. Sistema hau aerosorgailu batean ezarriko da, haizearen energia aprobetxatuz martxan jartzeko.

Sistema hauek Ipar Afrikako Itsaso Gorriaren kostaldeko puntu teoriko batean ebaluatuak izango dira, zehazki, Zafardarako basamortuan.

Lehenik eta behin, dokumentu osoan zehar ager daitezkeen kalkulu eta azalpenak ahalik eta modu egokienean ulertzeko, testuinguru teoriko batekin hasiko da.

Ondoren, erauzitako ur- kantitatearen eta prozedura hau egiteko beharrezkoa izan den energiaren arteko konparaketa gauzatuko da, helburu berberarako merkaturatutako beste teknologia batzuen laguntzarekin. Gainera, sistema hedatuagoen osagai esanguratsuena, esate baterako hozte sistema azalduko da, baita aztertutako hautabideak martxan jartzeko dauden aukerak ere aztertu egingo dira.

Teknologia hau testuinguruan jartzeko helburuarekin, ordezeko proposamen hau antolatu den parke eolikoari buruzko informazioa kontuan hartuko da, baita, parke horretan erabilitako aerosorgailuei buruzkoa ere.

Azkenik, dokumentu honi ekin egiteko beharrezkoak izan diren zereginak azalduko dira, besteak beste, aurrekontuari buruzko datuak, bideragarritasun azterketa teknikoa eta proiektuak ondorioztatzen dituen arriskuen azterketa.

### 1.3. Abstract

The aim of this project is to analyze different ways to obtain water from atmospheric air. As a novelty, a system for compressing the humid air in the environment is proposed. This system will be installed in a wind turbine, harnessing wind energy to put it into operation.

These systems will be evaluated for a theoretical site of operation on the North African coast of the Red Sea, specifically the desert of Zafarana.

In the first place, we will offer a theoretical introduction to the subject that we recommend you read in order to gain the best possible understanding of the calculations and explanations that will appear throughout the document.

We will then go on to make a comparison of the amount of water extracted and the energy needed to carry out this procedure versus other technologies already implemented commercially for the same purpose. In addition, we will describe the most significant components of the system in most widespread use, such as the cooling system, and set out a series of options for the start-up of the proposed alternative.

In order to put this technology into context, we will provide information on the wind farm being considered for this alternative proposal, as well as the wind turbines installed therein.

Finally, we will explain the tasks undertaken to prepare this document, and provide a budget statement, a technical feasibility analysis and a risk analysis of the project.

## 2. Listas

### 2.1. Lista de tablas

Tabla 1: Datos de entrada del aire húmedo al sistema .....	45
Tabla 2: Cálculos de extracción de agua mediante condensación.....	49
Tabla 4: Cálculos de extracción mediante compresión hasta punto de rocío.....	52
Tabla 5: Cálculos de extracción de agua mediante el sistema de compresión para 1000 l/día ...	53
Tabla 6: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones hasta 2,5 bares. ....	54
Tabla 7: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones de 2,9 a 3,6 bares .....	55
Tabla 8: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones para caudales pequeños .....	55
Tabla 9: l/kWh para diferentes compresores de pistón .....	66
Tabla 10: l/kWh para diferentes compresores de gran caudal de admisión. ....	68
Tabla 11: Resumen de horas internas.....	74
Tabla 12: Resumen de amortizaciones.....	74
Tabla 13: Resumen de gastos .....	75
Tabla 14: Resumen del presupuesto.....	75
Tabla 15: Impacto probabilidad .....	79
Tabla 16: Directrices de la OMS para la calidad del agua potable, establecidas en Génova, 1993 .....	89

## 2.2. Lista de ilustraciones

Figura 1: Gráfico sobre los recursos hídricos en el mundo .....	12
Figura 2: Gráfica relativa a los recursos de agua dulce en el planeta “World fresh water resources” .....	13
Figura 3: Gráfico de humedad relativa media anual en el planeta .....	14
Figura 4: Mapa de Egipto y Zafarana.....	15
Figura 5: Gráfica sobre la Humedad relativa cerca de Zafarana.....	16
Figura 6: Datos climáticos de la región de Zafarana.....	17
Figura 7: Planta del parque eólico Gulf of El-Zayt.....	18
Figura 8: Diagrama psicrométrico del aire húmedo (Mollier) .....	25
Figura 9: Curvas del diagrama de Mollier.....	26
Figura 10: Movimiento de las corrientes de aire a distintas temperaturas en el planeta .....	28
Figura 11: Ciclos del aire que forman las corrientes de viento debido a cambios de temperatura .....	28
Figura 12: Perfil de velocidades de un fluido (aire).....	30
Figura 13: Efecto de la rugosidad del terreno en la velocidad del viento .....	30
Figura 14: Ciclo de bomba de calor teórico .....	34
Figura 15: Ciclo de bomba de calor con simplificaciones para realización de cálculos .....	36
Figura 16: Diagrama T-s en función de si el compresor es isentrópico o no .....	37
Figura 17: Sistema de deshumidificación simplificado .....	38
Figura 18: Mecanismo de un compresor de pistón.....	39
Figura 19: Proceso de compresión del aire en compresores de tornillo .....	39
Figura 20: Proceso de compresión isoterma en el diagrama de Mollier .....	40
Figura 21: Proceso de condensación en el diagrama de Mollier .....	43
Figura 22: Sistema de extracción de agua EoleWater .....	43
Figura 23: Comparativa de velocidad de extracción de agua por compresión.....	56
Figura 24: Curva de potencia del aerogenerador G80-2.0 .....	58
Figura 25: Funcionamiento compresor Scroll .....	59
Figura 26: Condensación con refrigeración por aire. Carrier. (2009) .....	61
Figura 27: Seguridad de refrigerantes. Fuente: HC Refrigerants .....	63
Figura 28: Gráfica comparativa T <sup>a</sup> /presión R-22-R-410 <sup>a</sup> .....	64
Figura 29: Posibilidad de acoplamiento del sistema de compresión.....	69
Figura 30: Gráfico de relación entre temperatura y litros/kWh para el sistema de enfriamiento. ....	70
Figura 31: Gráfico de relación entre presión y litros/kWh para el sistema de compresión adiabática .....	71
Figura 32: Comparativa de puntos óptimos de funcionamiento .....	72
Figura 33: Diagrama Gantt.....	73
Figura 34: Gráfico de presupuesto .....	76
Figura 35: Esquema detallado del sistema "EoleWater" .....	87
Figura 36: Ficha técnica "EoleWater" .....	88

## 2.3. Lista de acrónimos

$w$ : Humedad específica

$P_v$ : Presión de vapor

$P_s$ : Presión de saturación

$P_a$ : Presión del aire

$\phi$ : Humedad relativa

$P$ : Presión absoluta

$T$ : Temperatura

$R$ : Constante universal de los gases ideales

$m$ : masa de aire

$\dot{m}$ : Flujo másico

$v$ : Volumen específico

$\rho$ : Densidad del aire

$u$ : Velocidad del viento

$n$ : Número de moles

$l$ : Litro

$h$ : Entalpía específica

$i$ : Entalpía específica para el diagrama de Mollier

$Q_{in}$ : Calor entrante o absorbido

$Pot$ : Potencia

$\dot{W}_C$ : Trabajo de compresión

$c_p$ : calor específico

### 3. Introducción

En el presente proyecto se realiza un análisis de diferentes sistemas de extracción de agua a partir del aire húmedo del ambiente que son acoplados a un aerogenerador de “*Gamesa Corporación Tecnológica, S.A.*” aprovechando la energía eólica como fuente de energía renovable para activar estos sistemas.

En primer lugar, se efectuará un acercamiento teórico de los conceptos más importantes del trabajo que nos acompañarán durante todo el trabajo, como son: la psicrometría y la energía eólica.

Seguidamente, se continuará con una puesta en escena de las condiciones medioambientales a las que se encuentra expuesta de la región donde se encuentran implantados estos sistemas, es decir, temperatura, humedad relativa y cantidad de agua potable para consumo.

A lo largo del mismo se presenta un análisis de la cantidad de agua que estos sistemas pueden extraer de la humedad del aire ambiente y por tanto cuál podría ser la mejor solución para implantar en la región elegida, además de la energía que necesitan para llevar a cabo el proceso, así como de los componentes necesarios para su funcionamiento.

## 4. Contexto

El agua es uno de los elementos naturales que se encuentra en mayor cantidad en el planeta Tierra, además es uno de esos elementos que más ayudan al desarrollo de las distintas formas de vida. Al igual que el oxígeno, el agua es esencial para que tanto los vegetales como los animales, el ser humano y todas las formas de vida conocidas puedan existir.

De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), la superficie de nuestro planeta está constituido aproximadamente el 71% por agua. De este porcentaje, el 96% son océanos y mares, mientras que el resto, denominado “agua dulce” por no tener concentraciones de sal, existe en el ambiente como vapor de agua, en los ríos, lagos, en los polos, los glaciares, en la humedad del suelo y en los mantos acuíferos, e incluso en los seres vivos.

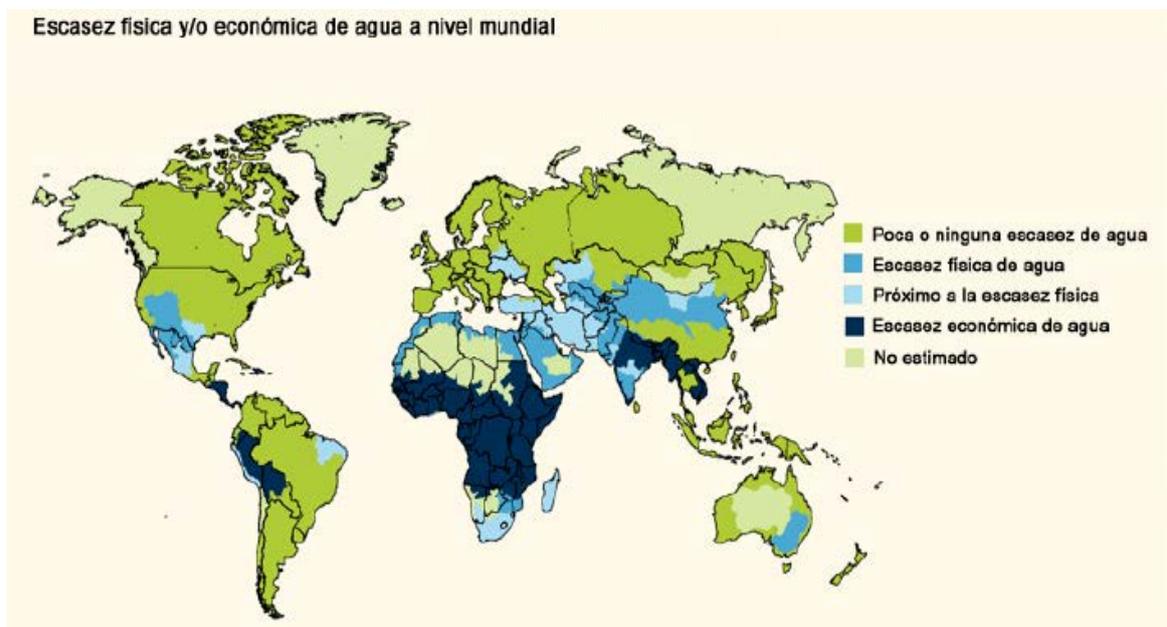


Figura 1: Gráfico sobre los recursos hídricos en el mundo

El agua es un bien necesario para toda la humanidad, y aunque estemos en el siglo XXI sigue habiendo regiones del planeta en las cuales es un bien muy escaso, como se aprecia en la figura 1. Por razones física o por problemas de contaminación entre otros, más de

600 millones de personas en todo el mundo no tiene acceso a agua potable. Por lo tanto, la obtención de soluciones rápidas y eficientes de producción tanto energética como de agua potable en dichas regiones ya no solo es un tema importante sino una necesidad

Debido a la situación en la que se halla el planeta, se debe analizar dónde se encuentran los recursos de mayor aprovechamiento de agua y los métodos para conseguirla.

Entre algunos de los sistemas más extendidos para conseguir estos efectos están la recogida de agua de la lluvia, la construcción de presas y de pozos o la canalización desde ríos o lagos.

En este trabajo, para obtener otra forma de extracción de esa agua que procede de la propia naturaleza se analizará la forma de obtención del agua presente en la atmósfera. De los 1.386.000.000 km<sup>3</sup> de agua que hay disponibles en sus tres estados de agregación (sólido, líquido y gaseoso) y distribuidos según el gráfico siguiente, podemos justificar que la extracción de agua del ambiente es una forma interesante de obtención ya que presenta un porcentaje de cantidad de agua dulce más alto que los ríos y los embalses juntos. [1]

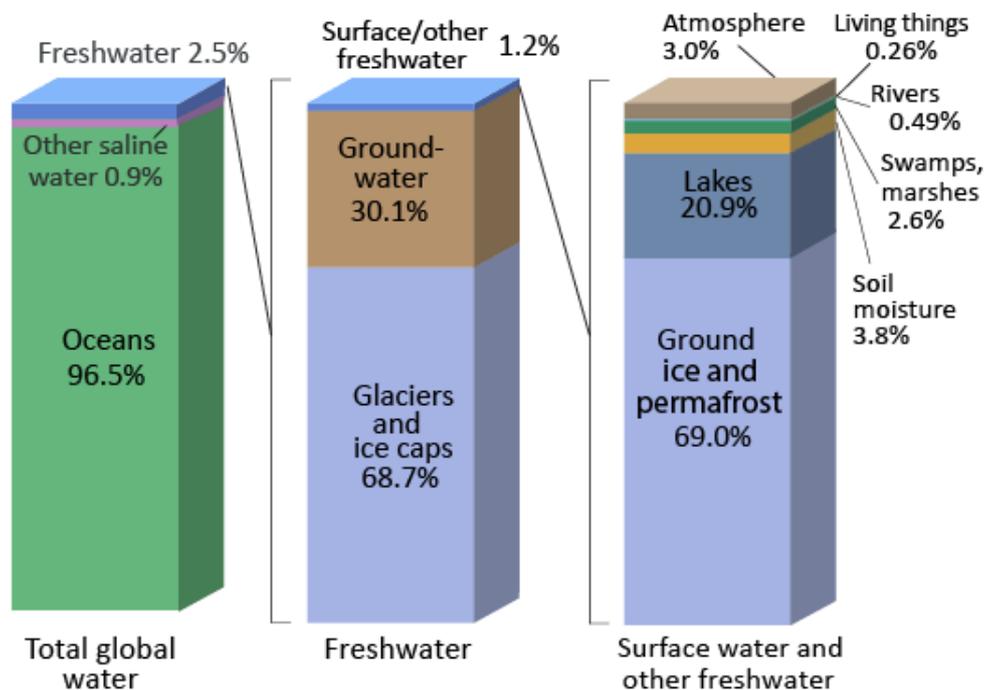


Figura 2: Gráfica relativa a los recursos de agua dulce en el planeta "World fresh wáter resources"

La ventaja que presentan las reservas de agua en la atmósfera es la de ser inagotable y renovable ya que, gracias a la continua evaporación de océanos, mares y lagos se regenera continuamente gracias al ciclo del agua.

El agua que se encuentra en la atmósfera se evalúa mediante la humedad relativa (relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría tener) de cada región:

### Average Yearly Humidity

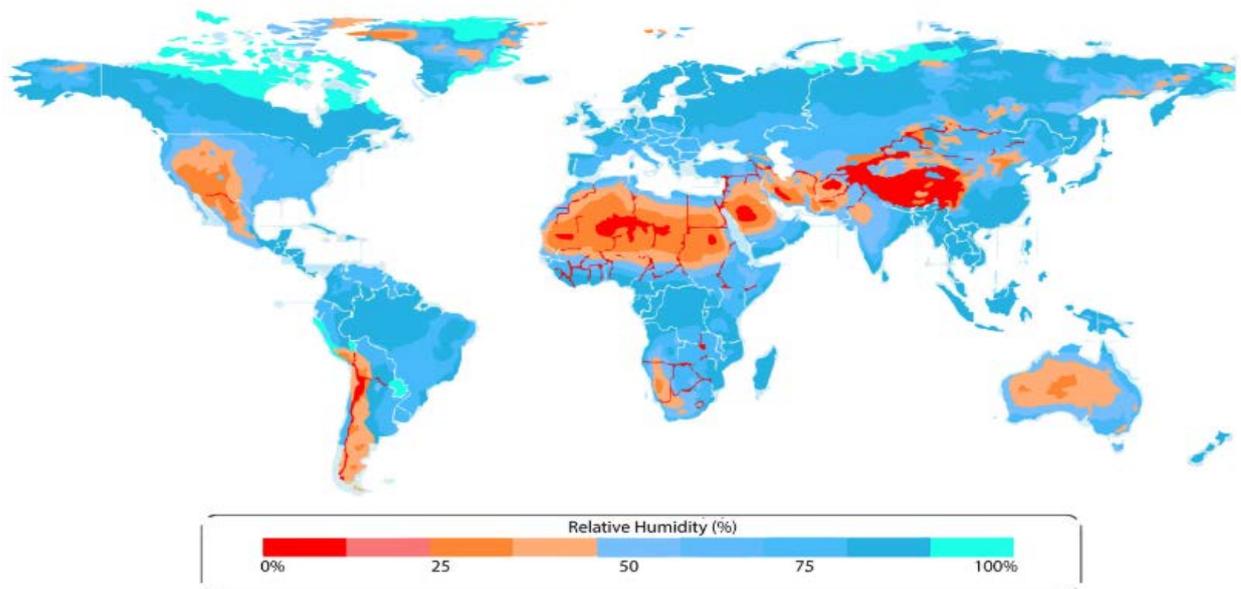


Figura 3: Gráfico de humedad relativa media anual en el planeta

Como se puede apreciar en la imagen, y comparándola con la escasez de agua en la región del planeta, se puede apreciar que muchos de los territorios con escasez de recursos hídricos se encuentran en una zona con una humedad significativa, sobre todo los costeros, de alto interés para este trabajo como es el desierto de Zafarana en la costa del Mar Rojo, donde se analizarán los sistemas descritos a lo largo de estas páginas.

## 4.1. Características físicas y naturales de Egipto y Zafarana

El grave problema que tiene Egipto para el suministro de agua potable debido a sus condiciones climatológicas ha empujado a distintos sectores a desarrollar nuevas iniciativas con el objetivo de aumentar tanto la capacidad de generación de electricidad como de las necesidades de abastecimiento de agua potable en la región.



Figura 4: Mapa de Egipto y Zafarana

La pluviosidad es casi nula prácticamente en todo el país. Las precipitaciones, por lo general, son de carácter torrencial, siempre inferiores a los 250 mm anuales, y las mayores cantidades se registran en el litoral. La media anual es de 180 mm, con máximo en las cumbres de 310 mm. La oscilación térmica anual es poco notoria, mientras que la oscilación diurna alcanza valores muy altos. El Nilo es la única fuente fluvial permanente en Egipto. Por ello el abastecimiento de agua es una de las mayores necesidades en el país. [2]

El Centro de Estudios Rurales de El Cairo asegura que unos cinco millones de egipcios viven sin suficiente acceso al agua potable, lo que equivale al 6% de la población. Según

estimaciones de la UNICEF (Fondo de Naciones Unidas para la Infancia), en el campo, sólo el 58% de sus habitantes tienen acceso a un sistema de alcantarillado que evite la contaminación de las escasas reservas. Además, se estima que la mayor parte de los 80 millones de habitantes del país –un 90% del cual es puro desierto- viven en el Alto Egipto y el Delta del Nilo, precisamente para aprovechar sus recursos, pero al ritmo de crecimiento de población actual –un millón de egipcios al año- será difícil encontrar agua potable para todos. [3]

Un mapa de vientos de Egipto, publicado en 2005, indica que, en la costa llana del mar Rojo, entre las localidades de Suez y Hurgada, hay viento suficiente para generar 20.000 megavatios de electricidad .El plan de Egipto para generar 7.200 megavatios logrará reducir las emisiones anuales de gases invernadero en 17 millones de toneladas de dióxido de carbono, uno de los gases que recalientan la atmósfera y son causantes del cambio climático.[4]

Investigadores egipcios y daneses estimaron que la velocidad del viento supera los 9 metros por segundo en esa zona, comparable a las condiciones del mar del Norte.

Otra posible ubicación para instalar parques eólicos es el valle del alto río Nilo y el desierto occidental, donde la velocidad del viento es de entre 6 y 7 metros por segundo.

El gobierno identificó más de 8.000 kilómetros cuadrados, similar a la superficie de Puerto Rico, para construir parques eólicos.

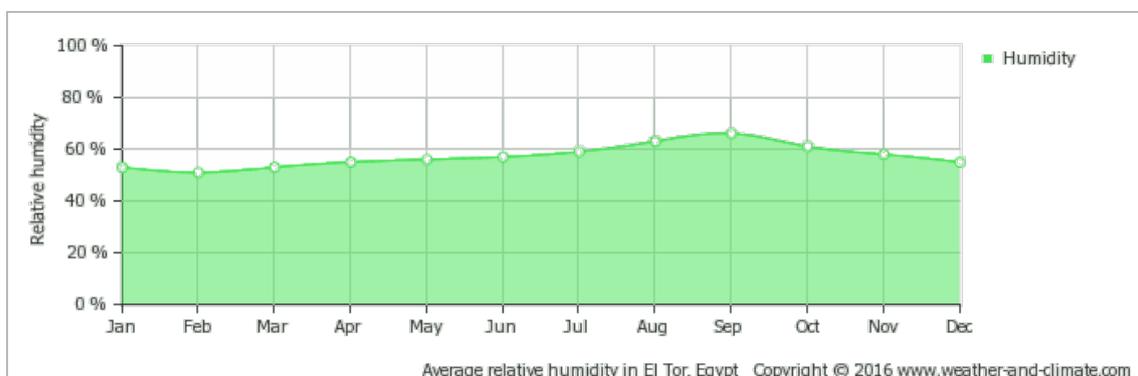


Figura 5: Gráfica sobre la Humedad relativa cerca de Zafarana

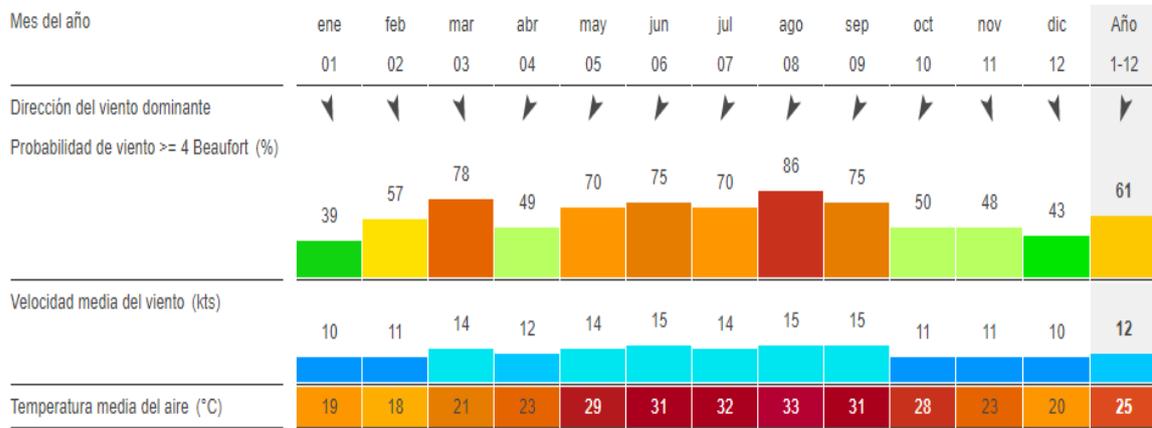


Figura 6: Datos climáticos de la región de Zafarana

Las figuras 5 y 6, obtenidas mediante datos de humedad relativa media anuales, temperatura media del aire y datos de velocidad y dirección del viento en Zafarana proponen un contexto en el que situar la región en cuanto a condiciones climáticas se refiere. [5]

## 4.2. El parque eólico

El Parque Eólico Gulf of El Zayt es un proyecto eólico de 200MW que ha sido construido en la orilla oeste del Golfo de Suez en el Golfo de El Zayt, Egipto. Se ha construido en un sitio ubicado aproximadamente a 12 km al oeste de Ras Shukeir en una zona árida costera entre el Golfo de El Zayt y Zafarana.

El proyecto ha sido construido en un área de 35 km<sup>2</sup>. Se espera que genere aproximadamente 800GW por año desde su puesta en marcha a partir de la segunda mitad de 2017, lo que será suficiente para satisfacer las necesidades de energía de aproximadamente 500.000 personas. También compensará 400.000 toneladas de emisiones de dióxido de carbono por año.

El parque eólico consta de 100 aerogeneradores Gamesa G80-2.0 de 2 MW cada uno, en hileras que serán perpendiculares a la dirección del viento. Las turbinas tienen aproximadamente 110 m de altura y estarán espaciadas entre 200 m y 300 m en una fila.

Las turbinas están instaladas en filas, espaciadas a 1 km, de dirección suroeste a noreste. La ubicación seleccionada recibe viento favorable con un factor de carga esperado de aproximadamente 45%.

El proyecto incluye la construcción de una subestación de 22 / 220kV y se interconecta con el corredor principal de la línea de transmisión por medio de una nueva línea aérea de 220kV. La red interna del parque eólico también cuenta con cables subterráneos.

Se presenta una medida de protección de aves de última generación que incluirá un sistema de apagado basado en radar a pedido.

Las zanjas de los cables de potencia se ubican a lo largo de las filas de las turbinas a una profundidad de entre 1 m y 1,5 m. Se han colocado tubos de plástico para sujetar los cables de control dentro de las zanjas en la parte superior de los cables de alimentación. Los cables de alimentación se conectan a una subestación central.

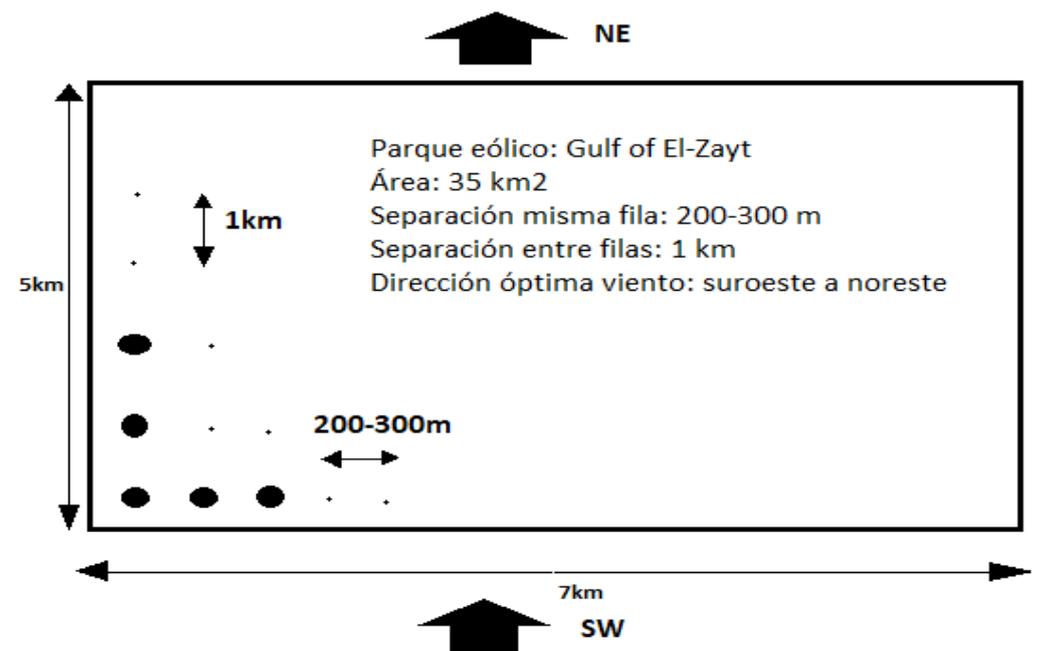


Figura 7: Planta del parque eólico Gulf of El-Zayt

## 5. Alcance y objetivos

El objetivo del proyecto es analizar diferentes alternativas de extracción de agua del ambiente para implantarlas en un aerogenerador y aprovechar el viento, portador del aire húmedo, tanto para la obtención de agua como para la producción de electricidad. Este análisis se efectuará considerando las condiciones del desierto de Zafarana pudiendo aprovechar el sistema para otras zonas de Egipto y reducir en la medida de lo posible el problema de la escasez de agua para la vida cotidiana en los países que acusan esta falta de recursos hídricos relativos al consumo, regadíos y trabajos agrícolas entre otros.

Los sistemas de extracción de agua que se analizarán son, por una parte, la condensación mediante un circuito de bomba de calor. Y por otro, un sistema de compresión del aire ambiente para extraer el agua de la humedad que contiene el mismo.

El análisis de los componentes de cada método también será uno de los objetivos del trabajo, ya que son los principales implicados en que estos sistemas funcionen de forma óptima.

Como objetivo final, se pretende hacer una comparativa o en su defecto una conclusión de si son sistemas lo suficientemente eficientes para abastecer de agua y electricidad a la población de al menos el pueblo de Zafarana.

El análisis de gastos en equipos no es un tema relativo a este proyecto por lo que no se profundizará en ello.

## 6. Acercamiento teórico

### 6.1. Psicrometría

La psicrometría es la ciencia que se dedica al estudio de las propiedades termodinámicas del aire húmedo y como éste va a ser nuestro objeto principal de estudio, será interesante definir las propiedades que lo competen.

El aire húmedo está constituido por una mezcla de aire seco y vapor de agua. Para el cálculo de sus parámetros se pueden utilizar ecuaciones analíticas que los relacionen o utilizar diagramas que han sido construidos a partir de dichas ecuaciones. En la práctica se utiliza en mayor proporción el método gráfico, ya que es más rápido y no difiere de forma significativa de la realidad.

El diagrama psicrométrico es un gráfico formado por curvas trazadas a partir de las ecuaciones de estado que relacionan los parámetros de la mezcla aire-vapor. Para determinar todos los parámetros es preciso disponer previamente de al menos tres de ellos, aunque en un gráfico de dos dimensiones resulta un problema representar a la vez las 3 variables por lo que para solventarlo se fija una de las variables, que será la presión atmosférica, esto es, se utilizará un diagrama distinto para cada presión. Para nuestros cálculos utilizaremos el diagrama de Mollier. De todos modos, cualquiera de los diagramas para una presión determinada representan la temperatura, humedad absoluta y relativa, grado de saturación temperatura de rocío volumen específico y entalpía específica. [6]

#### 6.1.1. Entalpía del aire húmedo

Para determinar la entalpía (cantidad de energía contenida en una sustancia, es decir, la proporción de energía que un sistema transfiere a su entorno), del aire húmedo, se puede tomar como origen de entalpías el 0°C; la entalpía total del aire húmedo  $i$  es la suma de las entalpías del aire seco  $i_a$  y del vapor de agua  $i_v$ , es decir:

$$i = i_a + i_v$$

**Entalpía del aire seco:** Cuando el aire se encuentra a la temperatura  $T$  en °C es:

$$i_a = c_{p(\text{aire seco})} \cdot T = 0,24 \cdot T \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} = T \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

**Entalpía del vapor de agua:** Como  $w$  es la cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera por kg de aire seco, y  $r$  es el calor de vaporización del agua, se puede poner:

$$i_v = w \cdot \{c_{p(\text{vapor de agua})} \cdot T + r\}$$

**Entalpía específica total:**

$$i = c_{p(\text{aire seco})} T + w \{c_{p(\text{vapor de agua})} T + r\} = c_{pa} T + c_{pv} w T + w r =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{pa} = 0,24 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) = 1 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) \\ c_{pv} = 0,47 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right) \\ r_{t=0^\circ\text{C}} = 595 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} \right) \end{array} \right\} = 0,24 T + 0,27 w T + 595 w = 0,24 T + \{0,47 T + 595\} w \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$$

**Entalpía del aire por debajo del punto de rocío:** En el caso en que la temperatura del aire húmedo esté por debajo de la del punto de rocío, éste puede agua no sólo en forma de vapor saturado, sino también en forma de líquido por encima de 0°C.

El aire húmedo sobresaturado contiene una masa de:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Aire seco} = m_a \\ \text{Vapor saturado} = w_{sat} m_a \\ \text{Agua líquida} = (w - w_{sat}) m_a \end{array} \right\}$

Y su entalpía para ( $m_a = 1$ ) es:

$$i = i_a + i_{v(\text{saturado})} + i_{\text{agua líquida}} = 0,24T + w_{sat}(0,47T + 595) + (w \cdot w_{sat})T$$

### 6.1.2. Humedad específica

La humedad específica es conocida como humedad absoluta o relación de humedad, y está representada con el símbolo  $\omega$ . Esta propiedad define la masa de vapor de agua presente en una unidad de masa de aire seco, y está dada en unidades de masa de vapor de agua entre unidades de masa de aire seco [ $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{kg}_{\text{A.S.}}$ ].

$$w = \frac{m_v}{m_a}$$

La humedad específica también se expresa como:

$$w = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_a}$$

Donde 0.622 está dado por la relación de pesos moleculares  $0.287/0.4615=0.6218$

Por otro lado, podemos expresar esta propiedad también como:

$$w = \frac{0,622 \cdot P_v}{P - P_v}$$

Donde P es la presión absoluta de la masa de vapor o de agua más la masa de aire seco,

$$P = P_a + P_v$$

### 6.1.3. Humedad relativa

Una de las características más importantes para la producción de agua a partir de la humedad del aire es la calidad del aire, relativo a la cantidad de vapor de agua contenido en él. El vapor de agua es el recurso principal para los sistemas expuestos, y el porcentaje de vapor en la atmósfera tiene una relación directa con la eficiencia energética de la extracción de agua. Este porcentaje es específico para una región en particular y debe ser

medido para un largo periodo de tiempo para garantizar un rendimiento superior entre el sistema diseñado y su entorno.

Humedad relativa, o "HR", mide la cantidad de agua en el aire en forma de vapor, comparándolo con la cantidad máxima de agua que puede ser mantenida a una temperatura dada. Por ejemplo, si la humedad es del 50% a 23°C, esto implicaría que el aire contiene 50% del nivel máximo de vapor de agua que podría mantener a 23 ° C. 100% de humedad relativa, indica que el aire está en la máxima saturación. Cuando el aire húmedo entra en contacto con el aire más fresco, o una superficie más fría, el vapor

de agua se convertirá en gotas de agua. Cuando esto ocurre en una superficie se conoce como el 'Punto de Rocío'. [7]

Hay que hacer algunas precisiones adicionales con este concepto. Se define la humedad relativa como la relación entre la fracción molar del vapor de agua en el aire y la fracción molar del vapor de agua en el aire saturado a la misma temperatura. [8]

$$\phi = 100 \cdot \frac{n_v}{n_{vS}}$$

$n_v$  = número de moles del vapor de agua en el aire

$n_{vS}$  = número de moles de vapor de agua en el aire saturado

Admitiendo un comportamiento del aire como gas ideal:

$$P \cdot v = n \cdot R \cdot T$$

y entonces:

$$\phi = 100 \cdot \frac{P_v}{P_{vS}}$$

Es decir, prácticamente, la humedad relativa se define como el tanto por ciento de presión de vapor que tiene el aire respecto de la máxima que puede tener a esa temperatura.

#### 6.1.4. Diagrama (i-w) del aire húmedo (Diagrama de Mollier)

Si sobre el eje de ordenadas se toma la entalpía del aire húmedo  $i$ , y sobre el eje de abscisas la humedad específica  $w$ , se obtiene el diagrama ( $i-w$ ), mediante el cual se consigue una simplificación considerable en los cálculos relacionados con el aire húmedo. Las isotermas del aire no saturado son rectas, porque los coeficientes de inclinación para las temperaturas dadas son magnitudes constantes, deduciéndose que cuanto más alta sea la temperatura, tanto más pendiente tendrá la isoterma; la inclinación mínima la tiene la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  que parte del origen de coordenadas como punto de referencia.

Las isotermas del aire no saturado, son comunes, cada una de ellas, para las diversas presiones del aire húmedo, con la condición de que estas presiones no sean demasiado grandes, de manera que siga siendo válida la aproximación a gas perfecto del aire húmedo.

En el diagrama ( $i-w$ ) de coordenadas oblicuas, las líneas de igual entalpía son paralelas y forman un mismo ángulo con el eje de las  $w$ , de  $34^{\circ}$  aproximadamente (Diagrama de Mollier). La inclinación de las isotermas en el sistema de ejes oblicuos crece también al aumentar la temperatura, siendo nula la inclinación de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ . Si el aire está saturado de vapor de agua, el seguir inyectando agua en él no conduce a aumentar su contenido de vapor, ya que éste ha alcanzado el máximo posible y la humedad condensará formando niebla. Las curvas del diagrama se pueden visualizar mejor en la figura 8 que se encuentra tras el diagrama de Mollier de la figura 7.

### Solución eólica de generación hidráulica vía aire húmedo

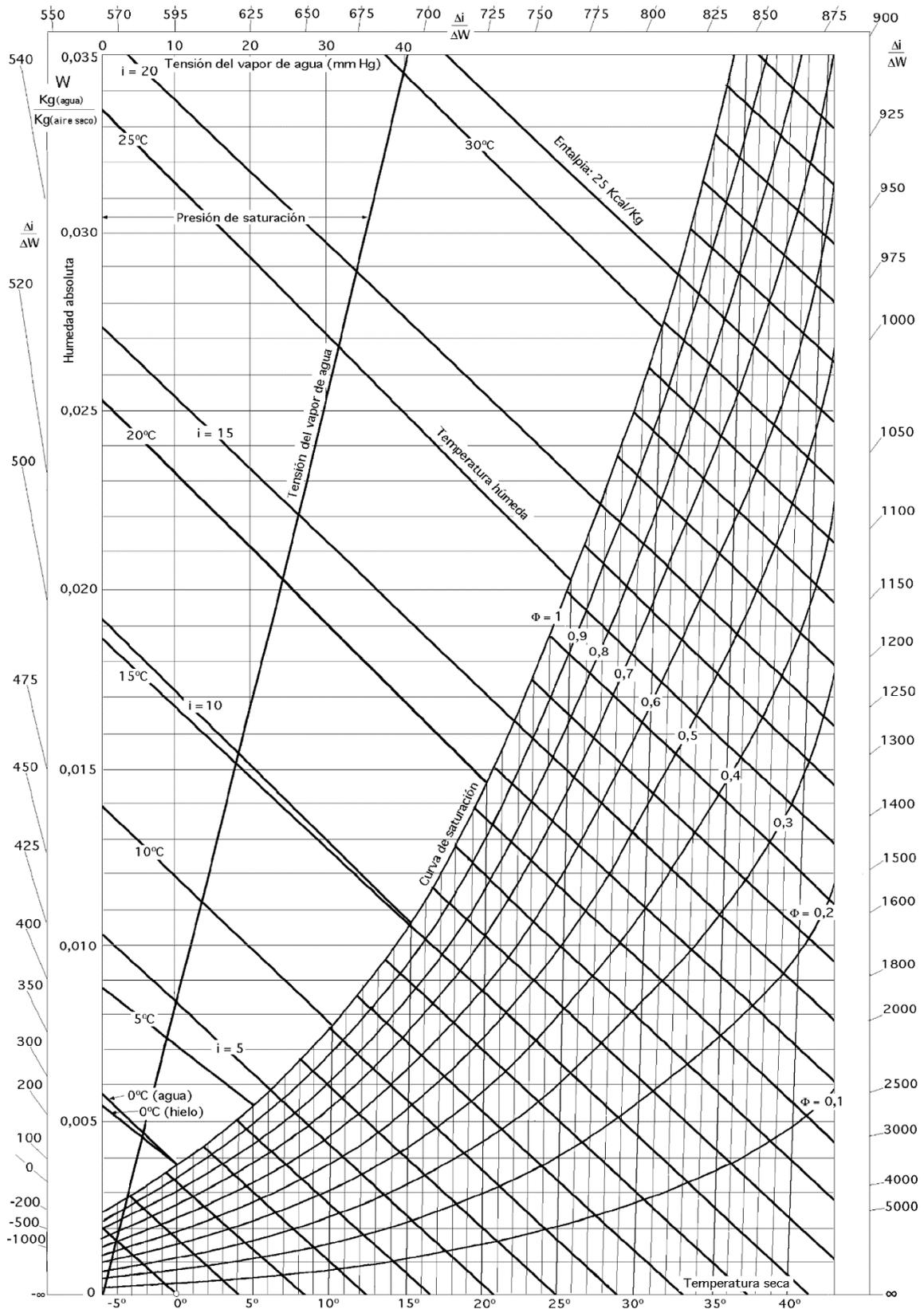


Figura 8: Diagrama psicrométrico del aire húmedo (Mollier)

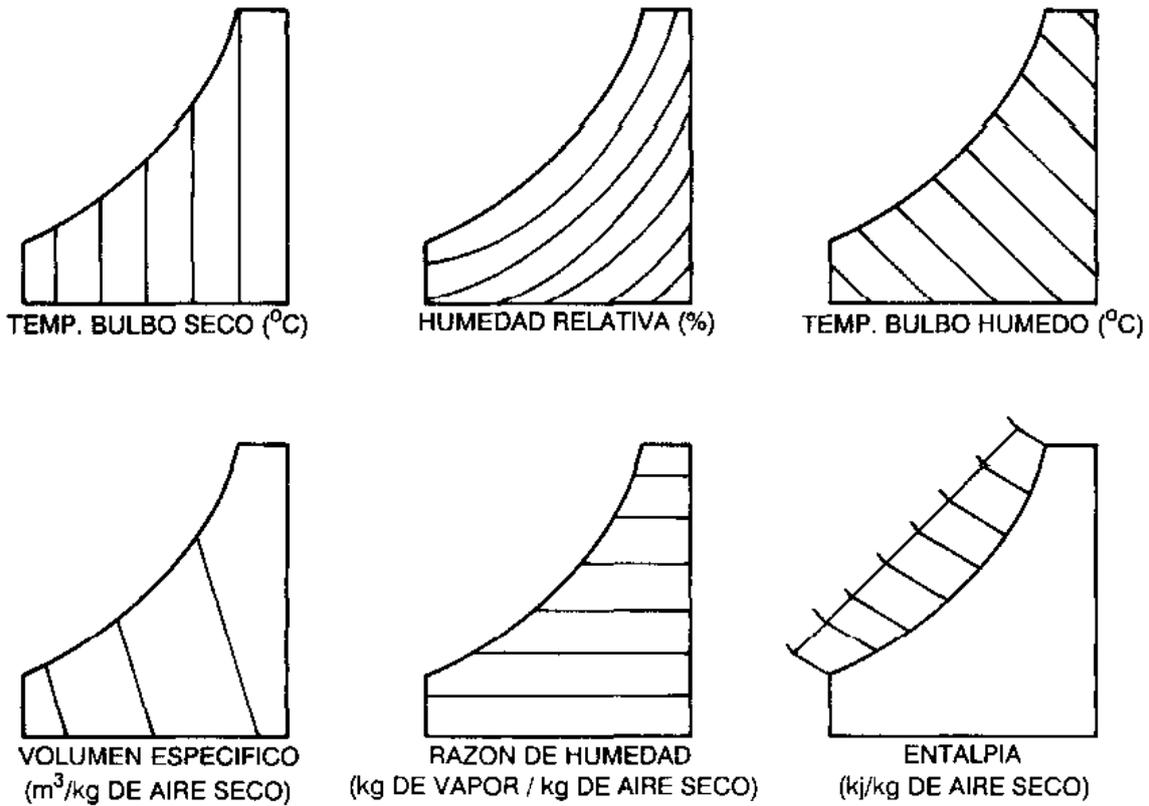


Figura 9: Curvas del diagrama de Mollier

El diagrama psicrométrico se utiliza normalmente para presiones de aire de 1 atm (1,013 bar), aunque se pueden ampliar las posibilidades haciéndolo independiente del valor de la presión citada.

Si la presión total del aire húmedo se encuentra a  $p \neq 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar}$ , la posición de la línea de humedad relativa  $\phi = 1$  variará, por cuanto:

$$w = 0,622 \cdot \frac{\phi \cdot P_s}{P - \phi \cdot P_s} = 0,622 \cdot \frac{\frac{\phi \cdot P_s}{P}}{1 - \frac{\phi \cdot P_s}{P}} = \left| k = \frac{\phi}{P} \right| = 0,622 \cdot \frac{k \cdot P_s}{1 - k \cdot P_s}$$

Si  $p = 1 \text{ bar}$ , las curvas  $k$  coinciden con las  $\phi$ .

La ecuación aproximada de la curva de saturación es para,  $p = 1 \text{ bar}$ , de la forma

$$T(^{\circ}C) = \frac{5291}{14,293 - \ln(w \cdot P) + \ln(w + 0,622)} - 273$$

En general, si  $P > 1$  bar  $\rightarrow$  la curva,  $\phi = 1$  se desplaza hacia arriba, y si es menor, hacia abajo.

Si:  $P > 1$  bar, por ejemplo:  $P = 1,1$ ,  $k = \frac{\phi}{1,1} = 0,9 \phi$

En este caso, el gráfico correspondiente a,  $P = 1$  bar se puede transformar en el gráfico,  $P = 1,1$  bar, teniendo en cuenta que, en el gráfico nuevo,  $\phi = 1$ , sería la curva  $\phi = 0,9$  del gráfico para,  $P = 1$  bar, y así sucesivamente.

## 6.2. Aprovechamiento de la energía eólica

La energía eólica será de gran importancia en este trabajo debido a que será la fuente de energía que alimentará los sistemas a analizar. A continuación, se detalla cómo se obtiene esta energía del viento que se utiliza como energía renovable.

La energía eólica es una transformación de la energía solar. El Sol irradia a la Tierra una energía de 174.423.000 GWh. Esta energía no llega a la Tierra de una manera uniforme, sino que calienta las zonas próximas al Ecuador más que las zonas polares. Además de esto, los continentes se calientan y enfrían más rápido que los océanos.

En la atmósfera el aire caliente es mucho más ligero que el aire frío, por lo que se eleva hasta una altura de aproximadamente 10Km, para posteriormente orientarse dirección norte y sur. De esta manera, las corrientes de aire frío se desplazan por debajo de las corrientes de aire caliente.

Así mismo, las masas de agua y aire se mueven en un sistema rotatorio, que no sigue una línea recta, sino que, debido a la rotación de la Tierra, sigue una trayectoria circular (en sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte, y en sentido contrario en el hemisferio sur). La ley de Coriolis explica esta dirección de giro del viento.

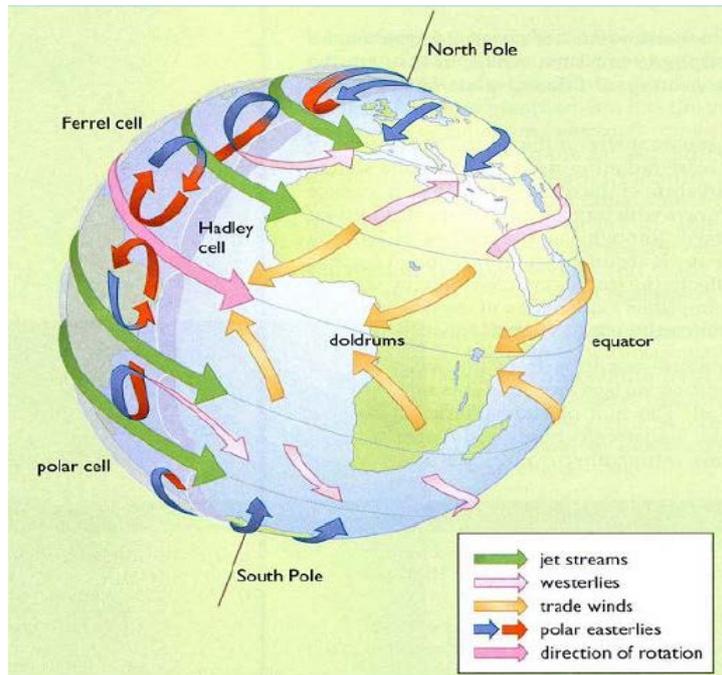


Figura 10: Movimiento de las corrientes de aire a distintas temperaturas en el planeta

Paralelamente, debido a la diferente velocidad de cambio de temperatura del aire en zonas de agua y zonas de continente, se establecen diferencias de presión, que influyen en la formación de corrientes de aire.



Figura 11: Ciclos del aire que forman las corrientes de viento debido a cambios de temperatura

En resumen, el viento no es más que las corrientes de aire que se forman al intentar compensarse la presión del aire en diferentes regiones.

Aproximadamente el 1% o el 2% de la energía que recibimos del Sol se transforma en energía eólica. [9]

La velocidad del viento se ve alterada por:

- La influencia de la altura sobre el nivel del suelo
- La influencia de la rugosidad del suelo
- La influencia de los obstáculos

### 6.2.1. Rugosidad y cizallamiento del viento

A una gran altura de la superficie de suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre apenas ejerce influencia alguna sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En la industria eólica se distingue como rugosidad del terreno, la influencia del contorno del terreno, también llamada orografía del área. [10]

#### **Rugosidad**

En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.

Obviamente, los bosques y las grandes ciudades ralentizan mucho el viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo ralentizan ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos ralentizan el viento de forma considerable.

#### **Cizallamiento del viento**

La cizalladura o cortante del viento es la diferencia en la velocidad del viento o su dirección entre dos puntos en la atmósfera terrestre. Dependiendo de si los dos puntos están a diferentes altitudes o en diferentes localizaciones geográficas, la cizalladura puede ser vertical u horizontal. [11]

También se puede definir como una variación especial de la velocidad del viento en la dirección vertical, pues lo normal es la velocidad horizontal del viento que, si se mide en una vertical, se observa que aumenta con la altura y es más baja cerca del suelo por el rozamiento con los obstáculos del terreno. [12]

Este fenómeno se puede apreciar mediante el perfil de velocidades a distintas alturas que se presenta a continuación:

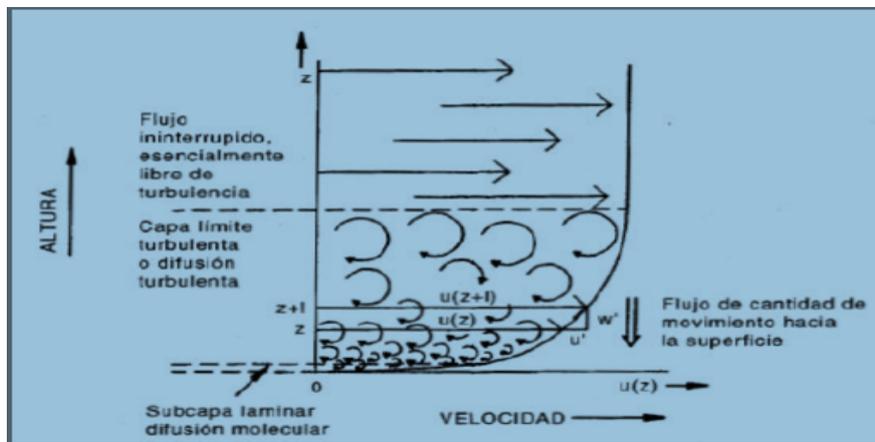


Figura 12: Perfil de velocidades de un fluido (aire)

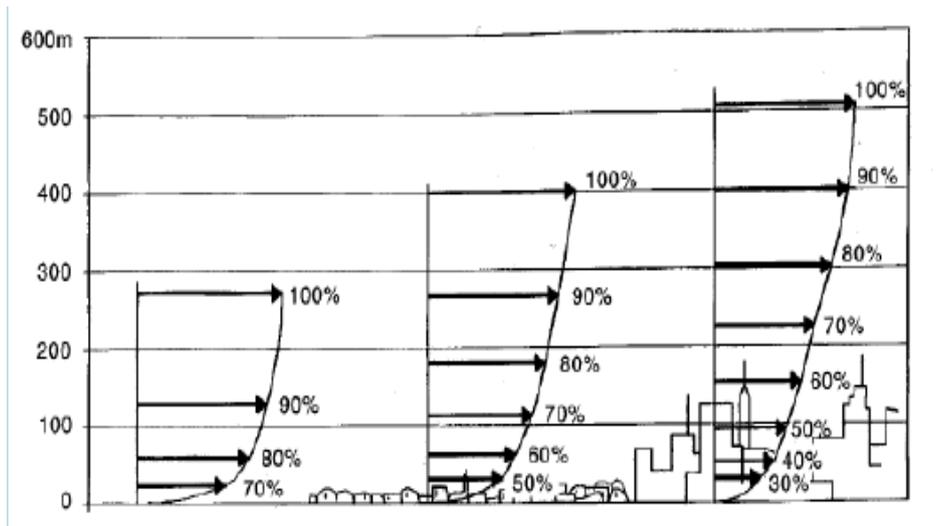


Figura 13: Efecto de la rugosidad del terreno en la velocidad del viento

### 6.3. Velocidad del viento a diferentes alturas

Existe una relación entre la velocidad del viento que se nos presenta a una altura que queramos y la velocidad en el mismo punto a una altura de 10 m. Esta relación también introduce la dependencia del tipo de terreno en el que se encuentre el aerogenerador a instalar mediante un factor que irá en forma creciente según aumente la rugosidad del terreno.

La fórmula viene dada por:

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n$$

Donde:

$u_0$  = Velocidad a altura  $h_0$  (10m)

$u$  = Velocidad a altura  $h$

Y el factor “n” es el que nos indica el tipo de terreno en el que nos encontramos:

Tipo de terreno	n
Liso (mar, arena, nieve)	0.10 – 0.13
Poco rugoso (hierba corta, cereales, regiones rurales)	0.13 – 0.20
Rugoso (bosques barrios)	0.20 – 0.27
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0.27 – 0.40

Así mismo, la energía que sacaremos del viento será la energía cinética que contenga la masa de aire ( $m$ ) que pasa a través de las palas del aerogenerador.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u^2 \text{ (Joules)}$$

## 6.4. Potencia del viento

La potencia se describe como la energía por unidad de tiempo, lo que nos lleva a la siguiente ecuación:

$$Pot = 0'5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad (\text{Watts})$$

Donde:

A = área de barrido de las palas

$\rho$  = densidad del aire

$u$  = velocidad del viento

### 6.4.1. Potencia eólica aprovechable

Las leyes de la física impiden que se pueda extraer toda la potencia disponible en el viento a su paso por el rotor de un aerogenerador. El viento a su paso se frena, saliendo del mismo con una velocidad menor que con la que ha entrado. Este inconveniente se representa mediante un factor de corrección  $C_p$  llamado coeficiente de potencia, y que supondrá una disminución de la potencia respecto de un caso ideal:

$$Pot_{aprov} = 0'5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \cdot C_p$$

y

$$C_p \leq \frac{16}{27} \quad (59,3\%) \quad \text{Límite de Betz (1928)}$$

Este coeficiente está alrededor del 40% en la práctica.

### 6.4.2. Potencia eólica aprovechable a diferentes alturas

También podemos relacionar la potencia a una altura dada con una altura de 10m de la cual tendremos datos de potencia, esta relación se representa mediante la ecuación:

$$\frac{Pot}{Pot_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{3n}$$

## 7. Beneficios del proyecto

Los sistemas de captación del aire húmedo que se describirán a continuación para la obtención de agua supondrían para el territorio de Zafarana una mejora en las condiciones de vida de sus habitantes, pudiéndose extraer esa agua para consumo de las personas o para actividades de regadío y agricultura. Esto supondría avanzar en un tema tan importante como satisfacer las necesidades básicas de los seres humanos las no puede conseguir de forma segura cuales un gran sector del planeta como consecuencia de la distancia a los recursos, contaminación de aguas o, simplemente, escasez de recursos hídricos para conseguirla.

El poder utilizar los aerogeneradores no sólo para la extracción de agua sino también para la producción eléctrica, significaría un progreso para esta región que se encuentra entre las zonas menos desarrolladas del planeta, obteniéndose mejoras en luz, comunicaciones o incluso con la posibilidad en un futuro de implantar también zonas para la recarga carga de coches eléctricos para conseguir poco a poco reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> con la implantación del máximo número de sistemas de energía renovable.

Estos sistemas proponen una innovadora tecnología en línea con las exigencias del desarrollo sostenible. La energía eólica es la única fuente de energía necesaria para operar estas turbinas de producción de agua con cero emisiones de CO<sub>2</sub>.

A diferencia de los pozos de agua o pozos perforados, siempre existirá agua en el aire. La restricción ha sido siempre diseñar una tecnología fiable capaz de crear y recoger esa agua disponible. Ahora estos sistemas permitirán a las personas que se encuentran en zonas remotas disponer de un abastecimiento sostenible de agua potable.

## 8. Análisis de alternativas

### 8.1. Metodología

En este apartado se efectuará la descripción de los pasos adoptados para la obtención de datos y cálculos. Se explicará el método de extracción de agua para ambas alternativas y finalmente se expondrán los resultados obtenidos.

#### 8.1.1. Método de extracción de agua mediante enfriamiento

En primer lugar, se procederá a explicar el funcionamiento básico de la bomba de calor, que posteriormente llevará a la descripción del proceso que concierne la condensación mediante enfriamiento, explicando el sistema comercial “EoleWater” ya implantado en algunas regiones del planeta. Este sistema de obtención de agua parte de la idea del ciclo de Rankine inverso que es la aplicación real del ciclo ideal inverso de Carnot.

Este ciclo consta de 4 estados representados en un diagrama T-s (Temperatura, entropía), por los que pasa el refrigerante a través de 4 dispositivos, cuyo funcionamiento en cada momento se explicará más adelante. El ciclo transcurre entre dos presiones, y se absorbe calor del foco frío (TC) y se cede al foco caliente (TH).

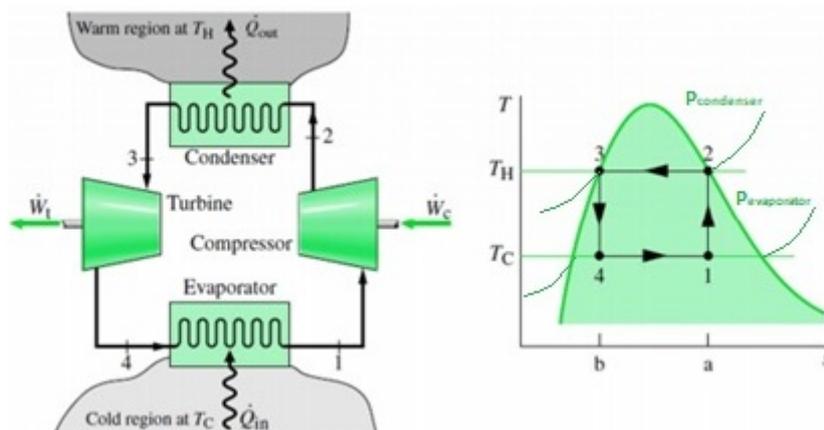


Figura 14: Ciclo de bomba de calor teórico

- El refrigerante entra en el evaporador como mezcla de líquido y vapor en el estado 4.

- 4-1 EVAPORADOR: parte del refrigerante cambia de fase de líquido a vapor debido al calor transferido del foco frío a temperatura  $T_C$  al refrigerante ( $P$  y  $T$  constantes).
- 1-2 COMPRESOR: se comprime adiabáticamente (sin intercambio de calor) hasta la situación de vapor saturado.
- 2-3 CONDENSADOR: cambia de fase desde vapor saturado hasta líquido saturado como consecuencia del calor transferido al foco caliente de temperatura  $T_H$  ( $P$  y  $T$  constantes).
- 3-4 EXPANSIÓN: expansión adiabática en una turbina.

Este sería el ciclo ideal de refrigeración de Carnot, pero en la situación real se producen desviaciones respecto a este caso ideal:

- (1) Para producir una transferencia de calor suficiente para mantener la temperatura del foco frío a  $T_C$ , con un evaporador de tamaño adecuado, requiere un salto térmico. Lo mismo ocurre en el condensador.
- (2) La compresión húmeda se evita normalmente ya que la presencia de gotas de líquido puede averiar el compresor.
- (3) La expansión produce una relativamente baja cantidad de trabajo comparada con el trabajo necesario en el proceso de compresión. Se renuncia al trabajo obtenido en la turbina y se sustituye por una válvula de estrangulación, con el consiguiente ahorro de costes de capital y mantenimiento.

Todo esto nos lleva a tener un sistema algo diferente del ideal y con unos cambios en el diagrama que se muestra a continuación:

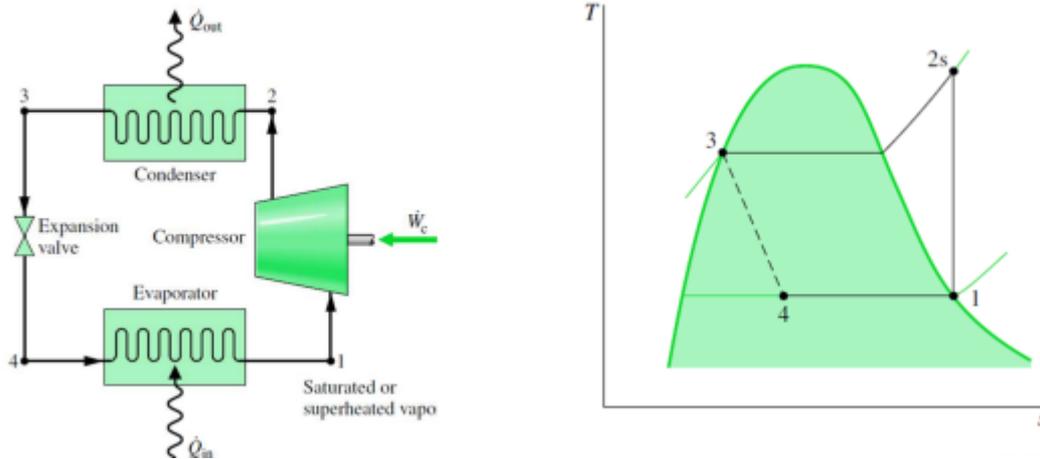


Figura 15: Ciclo de bomba de calor con simplificaciones para realización de cálculos

Siendo el coeficiente de operación (razón entre el calentamiento o enfriamiento proporcionado y la electricidad consumida.):

$$\beta = \frac{Q_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_c/\dot{m}} = \frac{h1-h4}{h2-h1}$$

#### COMPORTAMIENTO IDEAL DE LOS SISTEMAS CON COMPRESIÓN DE VAPOR

- Proceso 1-2s: Compresión isentrópica (adiabática y reversible) del refrigerante desde el estado 1 hasta la presión del condensador en el estado 2s.
- Proceso 2s-3: Transferencia de calor desde el refrigerante que fluye a presión constante en el condensador. El refrigerante sale como líquido en el estado 3.
- Proceso 3-4: Proceso de estrangulación desde el estado 3 hasta la mezcla bifásica líquido-vapor en 4.
- Proceso 4 -1: Transferencia de calor hacia el refrigerante que fluye a presión constante a través del evaporador hasta completar el ciclo.

#### COMPORTAMIENTO REAL DE LOS SISTEMAS CON COMPRESIÓN DE VAPOR

- (1) La transferencia de calor entre el refrigerante y las regiones caliente y fría no se produce de manera reversible: la temperatura del refrigerante en el evaporador debe ser menor que  $T_C$ , mientras que su temperatura en el condensador debe ser mayor que  $T_H$ .

- (2) El efecto de la compresión irreversible se puede contabilizar utilizando el rendimiento isentrópico del compresor.
- (3) Caídas de presión en el refrigerante que fluye a través del evaporador, el condensador y las tuberías que conectan los componentes. (Este efecto no se muestra en las figuras)
- (4) Vapor sobrecalentado en la salida del evaporador.
- (5) Subenfriamiento del estado a la salida del condensador.

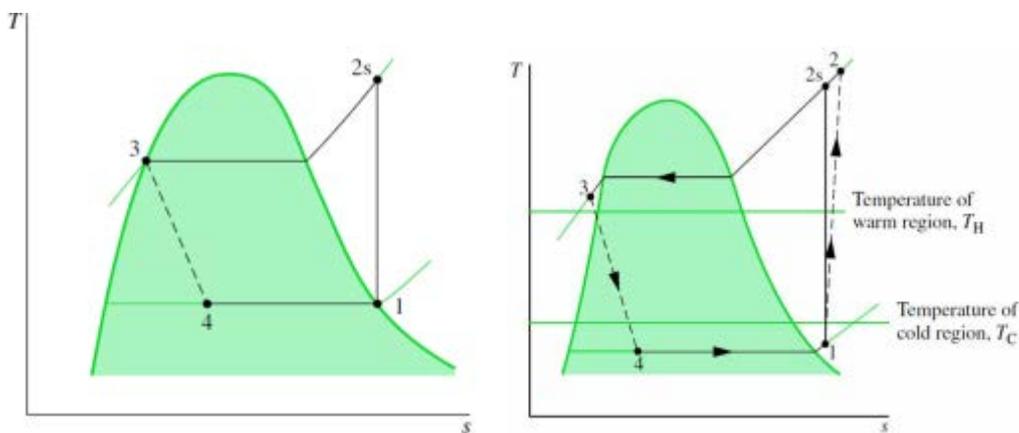


Figura 16: Diagrama T-s en función de si el compresor es isentrópico o no

El proceso que utilizamos para la extracción de agua por este método de condensación se denomina deshumidificación. Esto ocurre cuando una corriente de aire húmedo se enfría a presión de la mezcla constante hasta una temperatura inferior a la de rocío, y por lo tanto parte del vapor de agua presente al inicio se condensa. [13]

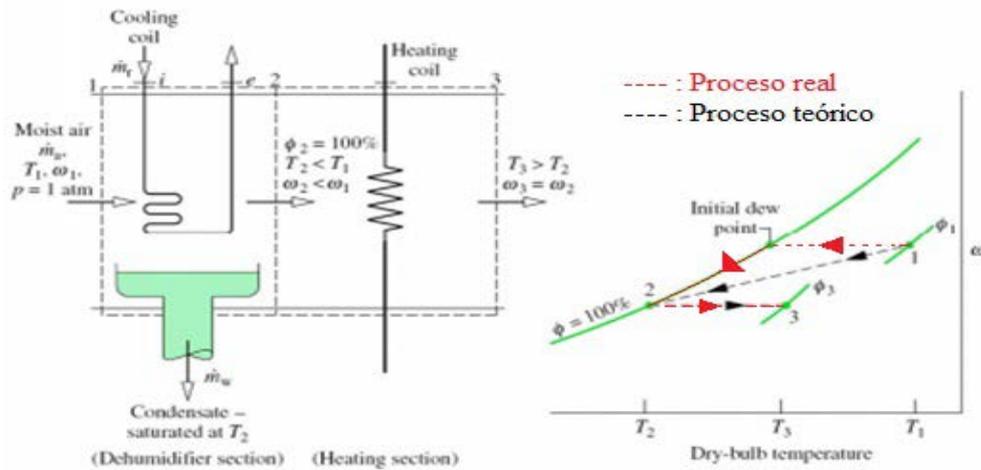


Figura 17: Sistema de deshumidificación simplificado

### 8.1.2. Método de extracción mediante compresión

En este apartado se va a explicar el proceso que sigue el aire húmedo cuando se comprime. Debido a que el proceso de compresión dentro de los compresores se produce a una velocidad lo suficientemente grande, éstos se consideran cuasi-adiabáticos, es decir con una pérdida de calor despreciable. Por lo que para simplificar los cálculos aun sabiendo que la temperatura del estado inicial y final son distintas, se considerará un proceso isoterma.

En dicho proceso de compresión, el aire aumenta su temperatura mientras disminuye su volumen y aumenta la presión del mismo.

A continuación, se procederá a dar una introducción sobre el funcionamiento de los compresores que posteriormente podrían utilizarse para este caso.

Los compresores de aire son aparatos que proporcionan energía a las herramientas y las máquinas industriales gracias a un sistema de funcionamiento concreto. Este sistema se basa en tomar gas, que normalmente y en la mayoría de las ocasiones es aire, que después comprimen en un espacio reducido llamado tanque.

El **compresor de pistón** es un compresor de desplazamiento positivo. En el compresor de pistón, el aire es aspirado al interior de un cilindro por la acción de un pistón accionado por una biela y un cigüeñal. Este mismo pistón, al realizar el movimiento contrario,

comprime el aire en el interior del mencionado cilindro, liberándolo a la red o a la siguiente etapa, una vez alcanzada la presión requerida. Este tipo de compresor puede ser lubricado o exento de aceite. En el caso del compresor exento, la cámara de aspiración y compresión queda aislada de cualquier contacto con el lubricante del compresor, trabajando en seco y evitando que el aire comprimido se contamine con los lubricantes del equipo.

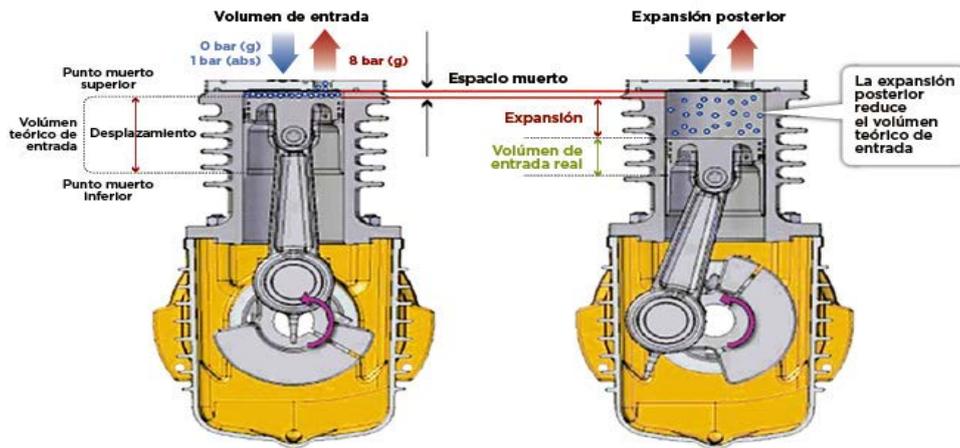


Figura 18: Mecanismo de un compresor de pistón.

Para los **compresores de tornillo**, los cuales son los más utilizados en la industria, la tecnología es más avanzada que su antecesor: el compresor alternativo o de pistón. Ambos sistemas son de desplazamiento positivo; la principal diferencia entre estas tecnologías está en la forma de comprimir, que en el caso del compresor de tornillo es continua a lo largo del rotor y en el de pistón lo hace en dos fases (aspiración y compresión). Esta forma de comprimir el aire en el pistón genera alteraciones en el flujo, mientras que la del tornillo produce un flujo de aire continuo. [14]

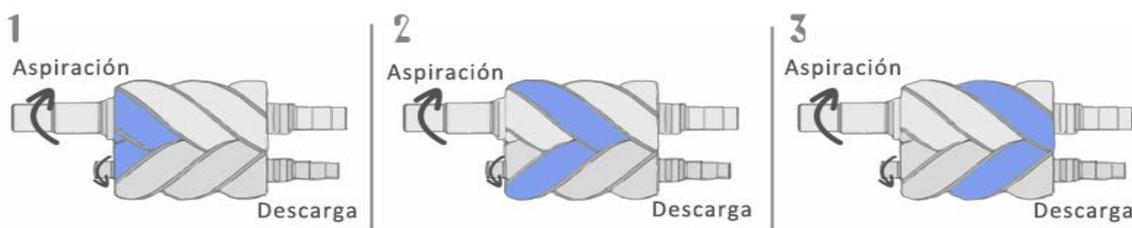


Figura 19: Proceso de compresión del aire en compresores de tornillo

Hay que recordar que los compresores al tomar el aire del ambiente también están tomando la humedad que existe. Por esta razón la mayoría de los sistemas de aire comprimido necesitan dispositivos de purga para extraer el agua que se produce durante el proceso. Dicho proceso será el que se analizará posteriormente para las alternativas mencionadas.

### Compresión adiabática

El desarrollo de esta alternativa se realizará suponiendo una temperatura del proceso de compresión constante y así poder ver, en el supuesto caso de conseguir este proceso cuánta cantidad de agua se podría extraer. Para ver más fácilmente dicho proceso se mostrará en el ya citado diagrama de Mollier:

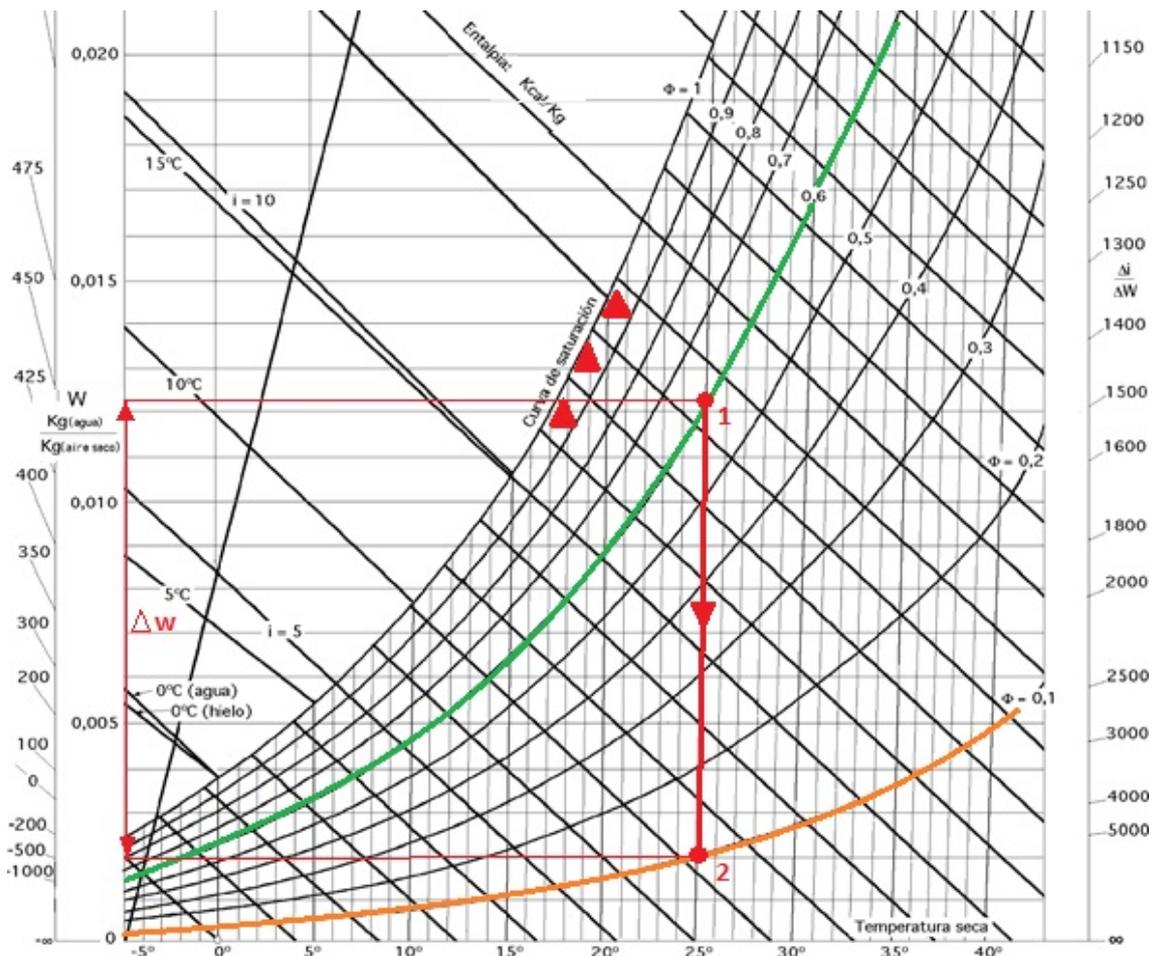


Figura 20: Proceso de compresión isoterma en el diagrama de Mollier

Para relacionar la temperatura, presión y humedad absoluta en cada punto durante la compresión se utilizará la ecuación aproximada de la curva de saturación del diagrama de Mollier del aire húmedo [15].

$$T(^{\circ}C) = \frac{5291}{14,293 - \ln(w \cdot P) + \ln(w + 0,622)} - 273$$

Manteniendo la  $T = \text{cte}$  se podrá apreciar cómo varían las otras dos variables en cada estado.

## 8.2. Cálculos

### 8.2.1. Enfriamiento

Para saber la cantidad de agua que se puede extraer mediante el proceso de enfriamiento y posterior condensación, se procede a realizar una serie de balances de masa y de acuerdo a las ecuaciones referidas a la humedad relativa y a la humedad absoluta.

Partimos de las condiciones iniciales de la mezcla:

-  $T^a = 25^{\circ}C$

-  $\phi = 60 \%$

-  $P = 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar}$

-  $\dot{V} = 15000 \text{ m}^3/\text{h} = 4,1667 \text{ m}^3/\text{s}$

Y comenzamos el cálculo a partir del dato de la humedad relativa y la temperatura a la que se encuentra la mezcla:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}(25^{\circ}C)} \rightarrow P_v = 0,6 \cdot 0,03169 = 0,019014 [\text{bar}]$$

Por tanto, la humedad específica en el estado inicial será:

$$w_1 = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} = 0,012056 [\text{kg}_{\text{agua}} / \text{kg}_{\text{aireseco}}]$$

El volumen específico del aire seco para estas condiciones será, por lo tanto:

$$v_{\text{aire}} = \frac{8,314 \cdot 298}{(P - \phi \cdot P_s(T)) \cdot 100} = 0,8718 \left[ m^3 / kg \right]$$

Por tanto, podemos obtener a partir del caudal volumétrico del aire húmedo que entra al sistema y el volumen específico del aire, el caudal másico de aire seco ( $\dot{m}_{A.S1}$ ), así como el caudal másico de vapor a la entrada ( $\dot{m}_{v1}$ ):

$$\dot{m}_{A.S1} = \frac{\dot{V}}{v_{\text{aire}}} = 4,77944 \left[ \frac{kg_{A.S}}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{A.S1} \cdot w_1 = 0,05762 \left[ \frac{kg_v}{s} \right]$$

Tras el enfriamiento a presión constante de la mezcla hasta una temperatura de 13,28°C, y realizando un balance de masa para este segundo estado:

$$w_2 = 0,622 \cdot \frac{P_{v,sat}(T_2)}{P - P_{v,sat}(T_2)}$$

$$T_2 = 13,28^\circ C$$

$$P_2 = P_1$$

$$P_{v,sat}(T_2) = 0,01525 \text{ bar} \rightarrow w_2 = 0,009634 [kg_{H_2O} / kg_{\text{aireseco}}]$$

$$\dot{m}_{v2} = \dot{m}_{A.S1} \cdot w_2 = 0,046046 [kg_v / s]$$

Por tanto, el agua que condensará mediante este proceso de enfriamiento será de:

$$\dot{m}_{\text{condensado}} = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v2} = 0,05762 - 0,046046 = 0,011574 [kg_{H_2O} / s]$$

Lo que supone, considerando la densidad del agua 1000 kg/m<sup>3</sup> una cantidad de agua extraída de aproximadamente **1000 litros/día**.

$$0,011574 \frac{kg_{H_2O}}{s} \cdot \frac{3600s}{1 \text{ hora}} \cdot \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1}{1000} \frac{m^3_{H_2O}}{kg_{H_2O}} \cdot 1000 \frac{\text{litros}}{m^3_{H_2O}} = 1000 \frac{\text{litros}}{\text{día}}$$

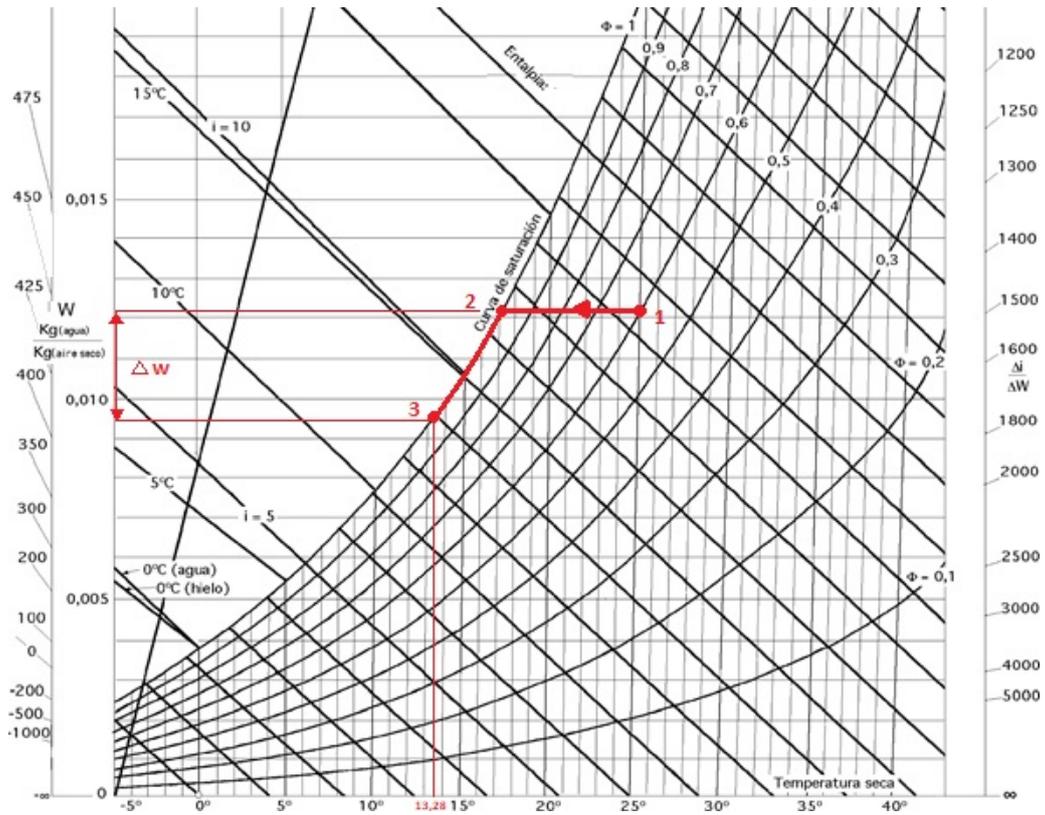


Figura 21: Proceso de condensación en el diagrama de Mollier

A continuación, se presenta el sistema EoleWater que utiliza el método descrito anteriormente para la extracción de agua mediante un circuito de bomba de calor como se aprecia en la imagen, con sus componentes básicos descritos en los puntos anteriores:

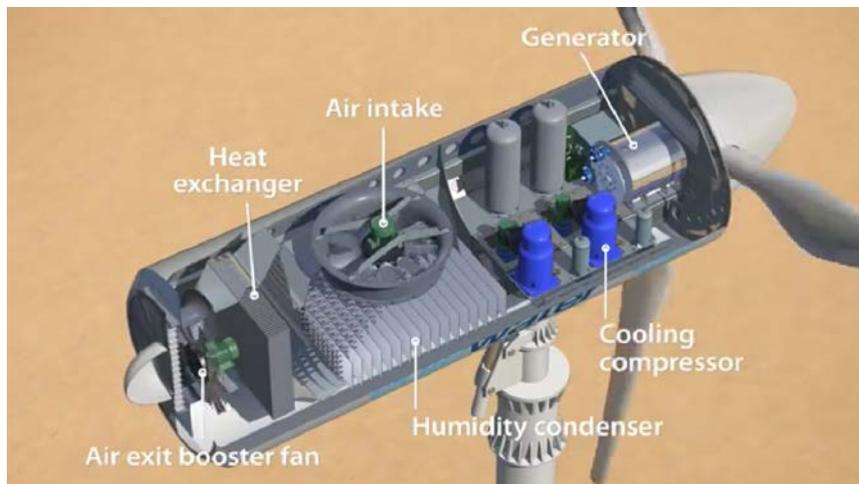


Figura 22: Sistema de extracción de agua EoleWater

Como vemos se trata de un sistema acoplado a un aerogenerador que está diseñado exclusivamente para la obtención de agua y no para el abastecimiento eléctrico. Esto se puede apreciar en su ficha técnica que se encuentra en el apartado de “Anexos”, donde, utiliza dos compresores de 15 kW cada uno, es decir, 30kW en total, que es la potencia nominal del aerogenerador.

Si implantamos este sistema en un aerogenerador de Gamesa G80/2MW para nuestro parque eólico, el cual hemos visto que nos puede ofrecer con una velocidad de viento nominal de 15 m/s una potencia de 2.000 kW, podríamos utilizar parte de esa energía eléctrica para la extracción de agua mientras el resto se utilizaría para el abastecimiento eléctrico. Es decir 1.970 kW se podrían utilizar para la producción de electricidad.

Debido a las condiciones climatológicas de nuestra zona en cuestión (25°C y cerca del 60% de humedad relativa) y observando en la ficha técnica del sistema del “EoleWater”, teniendo en cuenta que se utiliza la misma instrumentación, se podría extraer una cantidad de 1000 litros/día. Teniendo en cuenta que en Egipto el consumo de agua es de 80 litros por persona y día se podría abastecer por cada aerogenerador a unas 12,5 personas cada día mediante este sistema. [16]

Si solo hablamos de agua potable, el consumo por persona y día se estima alrededor de 3 litros, por lo que se podría abastecer las necesidades de más de 300 personas por aerogenerador.

A continuación, se presenta una serie de resultados donde se aprecia el seguimiento de las variables más significativas del proceso de condensación. Se mostrará una tabla con las condiciones a las que se encuentra el aire a la entrada del sistema, así como otros datos de interés que han sido necesarios para poder llevar a cabo los cálculos.

DATOS	Valor	Unidades
T <sup>a</sup> entrada	25	°C
Presión (bar) entrada	1	bar
H.R	60	%
Vol. Espec. Aire a la entrada: $v(T_a, P_a)$	0,87180	m <sup>3</sup> /kg
Caudal aire entrada	15000,00	m <sup>3</sup> /h
Caudal aire entrada	4,16667	m <sup>3</sup> /s
Presión sat. a T <sup>a</sup>	0,03169	bar
Hum. Específica: $w_1$	0,01206	kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>A.S</sub>
Flujo másico aire seco: $m_{a1}$ a T <sup>a</sup> =25°C	4,77940	kg <sub>A.S</sub> /s
Flujo másico vapor: $m_{v1}$	0,05762	kg <sub>v</sub> /s

Tabla 1: Datos de entrada del aire húmedo al sistema

Estos datos de entrada al sistema proporcionan los resultados que se exponen a continuación. Para un descenso de temperatura del aire húmedo, mediante la cesión de calor por parte de este aire hacia el evaporador de la bomba de calor, se han tomado de las tablas termodinámicas proporcionadas por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad del País Vasco las presiones de saturación de las diferentes temperaturas interpolando entre ellas.

La humedad específica se mantiene constante hasta que el proceso alcanza la curva de saturación, en la cual empezarán a aparecer las primeras gotas condensadas. A medida que avanzamos por dicha curva el descenso de temperatura supondrá una disminución del vapor de agua contenido en el aire húmedo. Dado que la ficha técnica del sistema “EoleWater” proporciona una cantidad de agua aproximadamente de 1000 litros/día se verá a continuación hasta qué temperatura es necesario llegar para conseguir esa cantidad de agua condensada.

Tras los resultados obtenidos se puede apreciar en las tablas que la temperatura a la que comienza a condensar, y por lo tanto el aire estará saturado será de  $16,7^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, es decir el punto de rocío. Y, a las condiciones en las que nos encontramos, para que la cantidad de agua extraída sea del orden de esos 1000 l/día se deberá seguir disminuyendo la temperatura hasta un valor de  $13,28^{\circ}\text{C}$ .

## Solución eólica de generación hidráulica vía aire húmedo

Extracción de agua por condensación							
Tª salida T2	Psat(T2)	W2	HR	mv1	mv2	(kgH2O/s)	(l/día)
25	0,03169	0,01206	0,60000	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
24,8	0,03132	0,01206	0,60705	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
24,6	0,03095	0,01206	0,61427	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
24,4	0,03059	0,01206	0,62166	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
24,2	0,03022	0,01206	0,62923	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
24	0,02985	0,01206	0,63698	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
23,8	0,02915	0,01206	0,65228	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
23,6	0,02880	0,01206	0,66021	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
23,4	0,02845	0,01206	0,66833	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
23,2	0,02810	0,01206	0,67665	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
23	0,02810	0,01206	0,67665	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
22,8	0,02777	0,01206	0,68470	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
22,6	0,02744	0,01206	0,69293	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
22,4	0,02711	0,01206	0,70136	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
22,2	0,02678	0,01206	0,71001	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
22	0,02645	0,01206	0,71887	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
21,8	0,02613	0,01206	0,72756	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
21,6	0,02582	0,01206	0,73646	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
21,4	0,02550	0,01206	0,74559	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
21,2	0,02519	0,01206	0,75494	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
21	0,02487	0,01206	0,76454	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
20,8	0,02457	0,01206	0,77374	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
20,6	0,02428	0,01206	0,78318	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
20,4	0,02398	0,01206	0,79284	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
20,2	0,02369	0,01206	0,80275	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
20	0,02339	0,01206	0,81291	0,05762	0,05762	0,00000	0,000

### Solución eólica de generación hidráulica vía aire húmedo

19,8	0,02311	0,01206	0,82283	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
19,6	0,02283	0,01206	0,83300	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
19,4	0,02254	0,01206	0,84342	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
19,2	0,02226	0,01206	0,85410	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
19	0,02198	0,01206	0,86506	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
18,8	0,02171	0,01206	0,87574	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
18,6	0,02144	0,01206	0,88668	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
18,4	0,02118	0,01206	0,89790	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
18,2	0,02091	0,01206	0,90941	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
18	0,02064	0,01206	0,92122	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
17,8	0,02039	0,01206	0,93261	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
17,6	0,02014	0,01206	0,94428	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
17,4	0,01988	0,01206	0,95625	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
17,2	0,01963	0,01206	0,96852	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
17	0,01938	0,01206	0,98111	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
16,8	0,01914	0,01206	0,99342	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
<b>16,69495</b>	<b>0,01901</b>	<b>0,01206</b>	<b>1,00000</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,00000</b>	<b>0,000</b>
16,6	0,01890	0,01198	1,00000	0,05762	0,05727	0,00035	30,423
16,4	0,01866	0,01183	1,00000	0,05762	0,05653	0,00109	94,449
16,2	0,01842	0,01167	1,00000	0,05762	0,05579	0,00183	158,444
16	0,01818	0,01152	1,00000	0,05762	0,05505	0,00257	222,407
15,8	0,01795	0,01137	1,00000	0,05762	0,05435	0,00327	282,611
15,6	0,01773	0,01123	1,00000	0,05762	0,05365	0,00397	342,787
15,4	0,01750	0,01108	1,00000	0,05762	0,05296	0,00466	402,935
15,2	0,01728	0,01093	1,00000	0,05762	0,05226	0,00536	463,056
15	0,01705	0,01079	1,00000	0,05762	0,05157	0,00605	523,149
14,8	0,01684	0,01065	1,00000	0,05762	0,05091	0,00671	580,025
14,6	0,01662	0,01051	1,00000	0,05762	0,05025	0,00737	636,877
14,4	0,01641	0,01038	1,00000	0,05762	0,04959	0,00803	693,705

14,2	0,01619	0,01024	1,00000	0,05762	0,04893	0,00869	750,507
14	0,01598	0,01010	1,00000	0,05762	0,04828	0,00934	807,285
13,8	0,01578	0,00997	1,00000	0,05762	0,04766	0,00996	860,856
13,6	0,01558	0,00984	1,00000	0,05762	0,04704	0,01058	914,405
13,4	0,01537	0,00971	1,00000	0,05762	0,04642	0,01120	967,933
<b>13,280</b>	<b>0,01525</b>	<b>0,00963</b>	<b>1,00000</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,04605</b>	<b>0,01157</b>	<b>1000,007</b>
13,2	0,01517	0,00958	1,00000	0,05762	0,04580	0,01182	1021,438
13	0,01497	0,00945	1,00000	0,05762	0,04518	0,01244	1074,922

Tabla 2: Cálculos de extracción de agua mediante condensación

La temperatura que se recalca es a la que debe llegar dicho sistema para conseguir obtener 1000 litros/día. Más adelante se explicará mediante un gráfico porque la condensación se convierte en poco beneficiosa a partir de aproximadamente esos grados.

### 8.2.2. Sistema de extracción de agua mediante compresión

#### Compresión adiabática

Para la realización de los cálculos relativos a la extracción de agua mediante la compresión del aire atmosférico que absorbe el sistema a temperatura constante, se mostrará cómo al comprimirlo se podrá llegar a la curva de saturación en la que la humedad relativa será del 100%, y por lo tanto la compresión posterior originará la condensación del vapor de agua que se encuentra en el aire húmedo del ambiente.

El diagrama psicrométrico se utiliza habitualmente para la presión del aire de 1 atm (760 mm de Hg, ó 1,013 bares), pero se pueden ampliar las posibilidades de uso del diagrama haciéndolo independiente del valor de la presión de 1 atm  $\approx$  1 bar, en lugar de utilizar un diagrama para cada presión total del aire.

En caso de que la presión total del aire sea  $P \neq 1$  bar, la curva de  $\phi = 1$  variará de posición como se vio en el apartado 6.1.4. De esta forma, por lo que respecta a las isotermas, si

para  $P = 1$  bar tenía una posición en concreto, para  $P = 1,1$  bar, la nueva isoterma arrancará de  $k = 0,9 \phi$ , y sería paralela a la anterior.

Si partimos de las condiciones iniciales a las que se encuentra el aire ambiente de la zona en cuestión:

- $P_1 = 1$  bar
- $T_1 = 25^\circ\text{C}$
- $\phi = 60\%$

Utilizando las fórmulas del aire húmedo para estas condiciones, obtenemos:

$$\phi = 0,6 = \frac{P_{v_1}}{P_{sat}(T_1)} \rightarrow P_{v_1} = 0,019014\text{bar}$$

$$w_1 = 0,622 \cdot \frac{P_{v_1}}{P - P_{v_1}} = 0,012056 \left[ \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{AireSeco}} \right]$$

Los cálculos se van a efectuar introduciendo el mismo caudal volumétrico que en el “EoleWater” y posteriormente se analizarán las posibilidades de distintos compresores en función del caudal que admiten.

El flujo másico de aire seco que atravesará el compresor será:

$$\dot{m}a1 = \frac{\dot{V}}{v} = \frac{15000/3600 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{0,87180 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)} = 4,77940 \left( \frac{\text{kg}A.S}{\text{s}} \right)$$

Siendo  $\dot{V}$  el flujo volumétrico, y  $v$  el volumen específico a las condiciones de entrada. El flujo másico de vapor se calculará a partir del flujo másico de aire seco y la humedad específica:

$$\dot{m}v1 = \dot{m}a1 \cdot w1 = 0,05762(\text{kg}_{H_2O}/\text{s})$$

El flujo másico de vapor a la salida que, junto al flujo másico de vapor a la entrada, nos proporcionará el agua extraída para cada cambio de presión se calcula igual que el  $\dot{m}v1$  aunque con la humedad específica a la salida en cada nueva presión.

Haciendo referencia al diagrama de Mollier, para que la curva  $\phi=0,6$  se convierta en  $\phi=1$  utilizando la relación de curvas K con las curvas  $\phi$  a partir de  $K=\frac{\phi}{P}$ ,  $0,6 \phi = \frac{\phi}{P} \rightarrow P = \frac{1}{0,6} = 1,667$  bar. Por lo que habría que comprimir el aire húmedo hasta la presión de 1,667 bar, para situarse en la curva de saturación y llegar por tanto al punto de rocío.

La ecuación aproximada de la curva de saturación para el diagrama de Mollier es:

$$T(^{\circ}C) = \frac{5291}{14,293 - \ln(w \cdot P) + \ln(w + 0,622)} - 273$$

Que para la  $T^a$  de entrada  $T_1 = 25^{\circ}C$  constante e incrementando la presión, tendríamos una humedad específica  $w_2 = 0,0119278 \frac{kg_{H_2O}}{kg_{A.S}}$

La humedad específica  $w_2$  se mantendrá constante hasta que la presión haga que la curva de saturación llegue hasta el punto inicial de  $25^{\circ}C$  y  $\phi = 0,6$ .

Los cálculos se han hecho para la obtención de la misma cantidad de agua, es decir 1000 l/día, que en el sistema "EoleWater", anteriormente mencionado.

Para verificar que la presión hasta la que hay que comprimir es 1,667 bares, también se ha despejado la humedad relativa a partir de la ecuación que engloba tanto dicha H.R como la presión y la humedad específica:

$$w = 0,622 \cdot \frac{\phi \cdot P_{sat}(T)}{P - \phi \cdot P_{sat}(T)} \rightarrow \phi = \frac{P}{P_{sat} \cdot \left(\frac{0,622}{w} + 1\right)}$$

Presión (bar)	w2 (kgH2O/kgA.S)	H.R %/100	m <sub>v1</sub> (kgH2O)	m <sub>v2</sub> (kgH2O)	Condensado (litros/s)	Condensado (litros/día)
1	0,01206	0,6000	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,1	0,01206	0,6600	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,2	0,01206	0,7200	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,3	0,01206	0,7800	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,4	0,01206	0,8400	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,5	0,01206	0,9000	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,6	0,01206	0,9600	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
<b>1,66666</b>	<b>0,01206</b>	<b>1,0000</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,00000</b>	<b>0,000</b>
1,7	0,01169	1,0000	0,05762	0,05588	0,00174	150,303

Tabla 3: Cálculos de extracción mediante compresión hasta punto de rocío

Tras llegar al punto de rocío, si seguimos comprimiendo, conseguiremos extraer el agua que contiene el aire húmedo. Para calcular la humedad específica se ha despejado ésta de la ecuación de la curva de saturación y manteniendo la temperatura constante, tan solo modificando la presión.

$$T(^{\circ}C) = \frac{5291}{14,293 - \ln(w \cdot P) + \ln(w + 0,622)} - 273 \rightarrow w2 = \frac{0,622}{\left\{ \left[ P \cdot e^{\left( \frac{5291}{T+273} \right) - 14,293} \right] - 1 \right\}}$$

Llegados a este punto, se ha podido obtener la cantidad de agua que se condensaría en caso de comprimir el aire de entrada ya que sabemos las humedades específicas a la salida para cada presión y con ello los flujos máxicos de vapor en las mismas.

Tras estas explicaciones se ha obtenido esta tabla donde se resumen los cálculos explicados:

Presión (bar)	w <sub>2</sub> (kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>A.S</sub> )	H.R %/100	m <sub>v1</sub> (kg <sub>H2O</sub> )	m <sub>v2</sub> (kg <sub>H2O</sub> )	Condensado (litros/s)	Condensado (litros/día)
1	0,01206	0,6000	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,1	0,01206	0,6600	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,2	0,01206	0,7200	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,3	0,01206	0,7800	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,4	0,01206	0,8400	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,5	0,01206	0,9000	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
1,6	0,01206	0,9600	0,05762	0,05762	0,00000	0,000
<b>1,66666</b>	<b>0,01206</b>	<b>1,0000</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,00000</b>	<b>0,000</b>
1,7	0,01169	1,0000	0,05762	0,05588	0,00174	150,303
1,8	0,01103	1,0000	0,05762	0,05272	0,00490	423,286
1,9	0,01044	1,0000	0,05762	0,04990	0,00772	667,053
2	0,00991	1,0000	0,05762	0,04736	0,01026	886,05445
<b>2,05639</b>	<b>0,00963</b>	<b>1,0000</b>	<b>0,05762</b>	<b>0,04605</b>	<b>0,01157</b>	<b>1000,01191</b>

Tabla 4: Cálculos de extracción de agua mediante el sistema de compresión para 1000 l/día

Tras comprobar que el caudal de entrada para que se cumplan estos resultados debe ser lo suficientemente alto, y tras analizar varios compresores, se ha detectado que el peso y el volumen de dichos compresores son tan grandes que podrían ser un problema para el acoplamiento. Por lo tanto, se han analizado distintas posibilidades en función de diferentes caudales para conseguir para misma cantidad de agua y ver hasta que presiones se debería llegar para conseguir este objetivo.

Para ello se ha realizado una tabla que se mostrará a continuación, en la cual aparece la cantidad de agua que se podría obtener para cada caudal volumétrico de entrada, junto con las presiones hasta las cuales habría de comprimir el flujo de entrada para conseguir los resultados esperados.

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Presiones (bar)								
	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
<b>15000</b>	150,30	423,29	667,05	886,05	<b>1083,88</b>	1263,47	1427,22	1577,14	1714,92
<b>14500</b>	145,29	409,18	644,82	856,52	<b>1047,75</b>	1221,35	1379,64	1524,57	1657,76
<b>14000</b>	140,28	395,07	622,58	826,98	<b>1011,62</b>	1179,23	1332,07	1472,00	1600,59
<b>13500</b>	135,27	380,96	600,35	797,45	<b>975,49</b>	1137,12	1284,50	1419,43	1543,43
<b>13000</b>	130,26	366,85	578,11	767,91	<b>939,36</b>	1095,00	1236,92	1366,86	1486,26
<b>12500</b>	125,25	352,74	555,88	738,38	903,24	<b>1052,89</b>	1189,35	1314,28	1429,10
<b>12000</b>	120,24	338,63	533,64	708,84	867,11	<b>1010,77</b>	1141,77	1261,71	1371,94
<b>11500</b>	115,23	324,52	511,41	679,31	830,98	<b>968,66</b>	1094,20	1209,14	1314,77
<b>11000</b>	110,22	310,41	489,17	649,77	794,85	926,54	<b>1046,63</b>	1156,57	1257,61
<b>10500</b>	105,21	296,30	466,94	620,24	758,72	884,43	<b>999,05</b>	1104,00	1200,44
<b>10000</b>	100,20	282,19	444,70	590,70	722,59	842,31	<b>951,48</b>	1051,43	1143,28
<b>9500</b>	95,19	268,08	422,47	561,17	686,46	800,19	903,90	<b>998,86</b>	1086,12
<b>9000</b>	90,18	253,97	400,23	531,63	650,33	758,08	856,33	946,28	<b>1028,95</b>
<b>8500</b>	85,17	239,86	378,00	502,10	614,20	715,96	808,76	893,71	<b>971,79</b>
<b>8000</b>	80,16	225,75	355,76	472,56	578,07	673,85	761,18	841,14	914,62
<b>7500</b>	75,15	211,64	333,53	443,03	541,94	631,73	713,61	788,57	857,46
<b>7000</b>	70,14	197,53	311,29	413,49	505,81	589,62	666,03	736,00	800,30

Tabla 5: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones hasta 2,5 bares.

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Presiones (bar)							
	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
7000	<b>1012,66</b>	1056,80	1103,08	1148,82	1194,56	1240,30	1286,05	1331,79
6500	940,32	981,32	<b>1019,64</b>	1055,54	1089,25	1120,96	1150,83	1179,04
6000	867,99	905,83	941,21	974,35	<b>1005,46</b>	1034,73	1062,31	1088,34
5500	795,66	830,35	862,77	893,15	921,67	948,50	973,78	<b>997,65</b>
5000	723,33	754,86	784,34	811,96	837,89	862,27	885,26	906,95
4500	650,99	679,37	705,90	730,76	754,10	776,05	796,73	816,26
4000	578,66	603,89	627,47	649,57	670,31	689,82	708,21	725,56
3600	520,79	543,50	564,72	584,61	603,28	620,84	637,38	653,01
3500	506,33	528,40	549,04	568,37	586,52	603,59	619,68	634,87

Tabla 6: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones de 2,9 a 3,6 bares

Debido a que los caudales siguen siendo significativamente altos y que las presiones no son excesivamente altas para la capacidad de un compresor industrial, se va a analizar la cantidad que se podría conseguir con caudales relativamente pequeños y las presiones finales asociadas:

Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Presiones (bar)								
	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10
500	136,66	136,97	137,28	137,58	137,88	138,17	138,46	138,73	<b>139,01</b>
400	109,33	109,58	109,83	110,07	110,30	110,54	110,76	110,99	<b>111,21</b>
300	81,99	82,18	82,37	82,55	82,73	82,90	83,07	83,24	<b>83,40</b>
200	54,66	54,79	54,91	55,03	55,15	55,27	55,38	55,49	<b>55,60</b>
100	27,33	27,39	27,46	27,52	27,58	27,63	27,69	27,75	<b>27,80</b>

Tabla 7: Relación de agua extraída para diferentes caudales y presiones para caudales pequeños

Para mostrar de una forma más ilustrativa la tendencia que tiene este proceso para conseguir agua se mostrará en la siguiente figura la cantidad en función de la presión que se alcanza en cada instante.

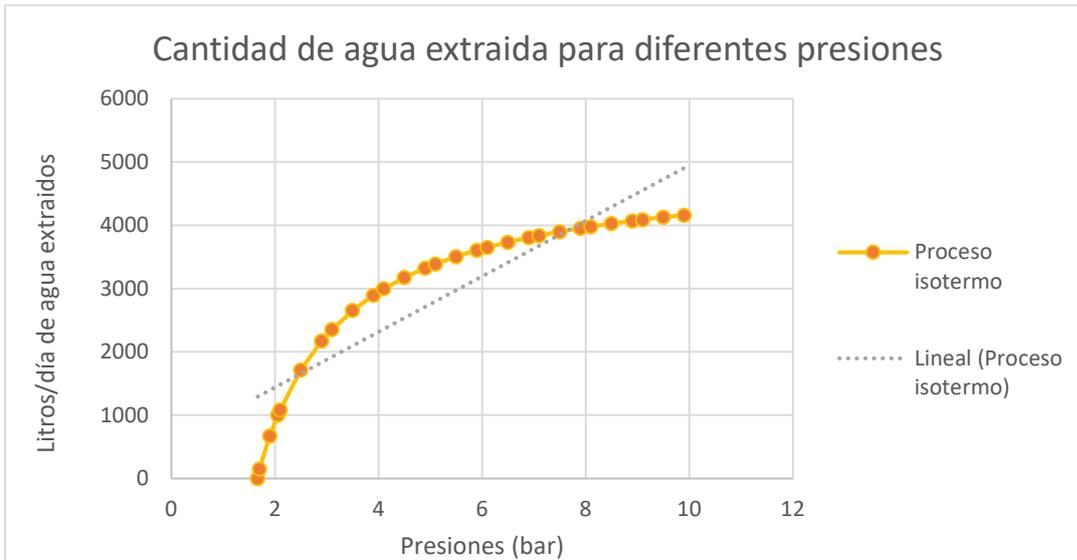


Figura 23: Comparativa de velocidad de extracción de agua por compresión

A la vista de la figura 23 se puede apreciar cómo, a partir de una compresión mayor de 7-8 bares el aumento de la cantidad de agua extraída es menos pronunciado que durante el proceso a presiones menores. Por lo que no interesaría gastar energía a partir de dichos valores para ganar poco más de agua.

## 9. Selección de la solución

### 9.1. Aerogeneradores Gamesa “G80-2.0”

Para la implantación de los dispositivos de extracción del agua a partir del aire húmedo se utilizarán los aerogeneradores que se encuentran instalados en el parque eólico de Gamesa en Gulf of El-Zayt cerca de Zafarana.

El parque eólico constará de 100 aerogeneradores Gamesa G80-2.0 de 2 MW (2000 kW) cada uno. Éstos, al tener 80 metros de diámetro, tendrán un área de barrido de 5027 m<sup>2</sup>. La ubicación seleccionada recibe viento favorable con un factor de carga esperado de aproximadamente 45%. Y según los estudios allí elaborados se han establecido estos datos sobre el viento:

- Velocidad mínima de viento: 3,5 m/s
- Velocidad nominal de viento: 15 m/s
- Velocidad máxima de viento: 25 m/s

### 9.2. Datos turbina G80/2000

- Fabricante : Gamesa (España)
- Turbina eólica: G80/2000
- Potencia: 2.000 kW
- Diámetro: 80 m
- Área de barrido: 5.027 m<sup>2</sup>
- Densidad de potencia: 2,52 m<sup>2</sup>/kW
- Número de palas: 3
- Limitación de potencia: Pitch

#### **Rotor**

- Velocidad mínima del rotor: 9 vuelta/min
- Velocidad máxima del rotor: 19 vuelta/min
- Velocidad mínima de viento: 3,5 m/s

- Velocidad nominal de viento: 15 m/s
- Velocidad máxima de viento: 25 m/s

### Caja de cambios

- Caja de cambios: Si
- Niveles: 3
- Ratio 100,5

### Generador

- Tipo: DFIG
- Número: 1
- Velocidad de salida máxima del generador: 1900 vuelta/min
- Tensión de salida: 690 V

### Torre

- Altura mínima de la góndola: 60 m
- Altura máxima de la góndola: 100 m

### Curva de potencia

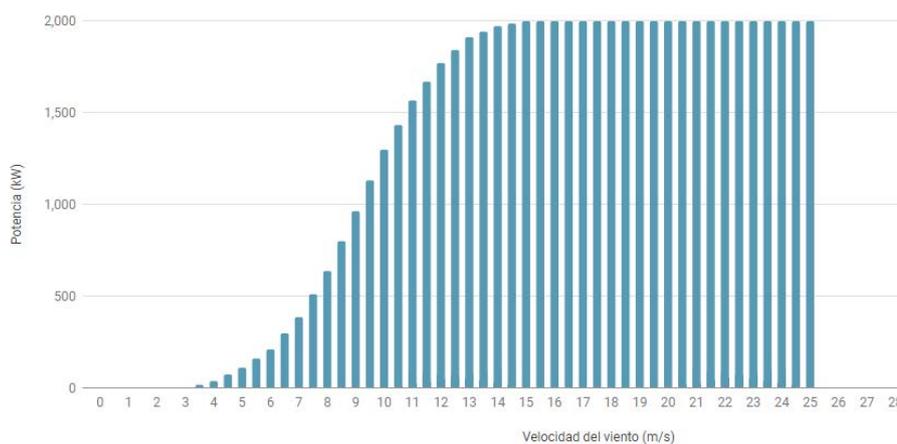


Figura 24: Curva de potencia del aerogenerador G80-2.0

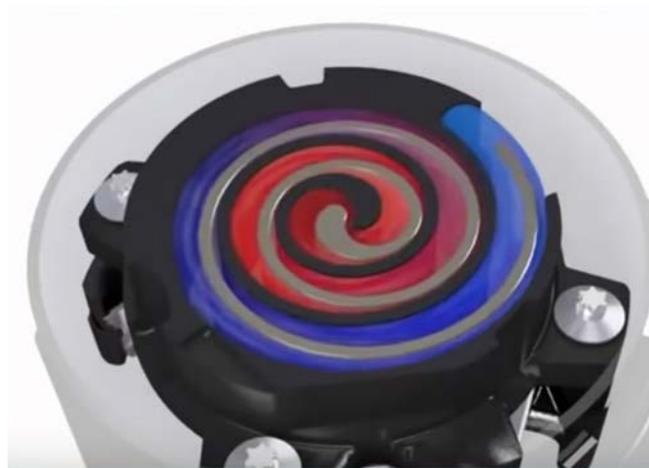
### 9.3. Componentes de la instalación del proceso de enfriamiento

A continuación, se presentan los dispositivos más importantes del sistema de condensación o deshumidificación así como los procesos que se dan para conseguir una calidad del agua suficiente para abastecimiento y consumo.

#### **Compresor:**

Para el proceso de compresión del refrigerante se utilizarán 2 compresores “Copeland Scroll”. Este tipo de compresores disponen de dos espirales, de las cuales una se encuentra fija y unida al cuerpo del compresor y, la otra, describe una órbita de trayectoria definida con respecto a la primera.

Este movimiento relativo de una espiral frente a la otra es el que favorece que las bolsas de gas que se generan en el interior de las espirales se desplace de forma continua a través de las mismas. A medida que este gas se mueve a través de las diferentes bolsas el volumen que ocupan es cada vez menor, lo que provoca que la temperatura y la presión del gas aumenten hasta la presión deseada.



*Figura 25: Funcionamiento compresor Scroll*

Algunas de las ventajas de las que dispone este sistema es la capacidad de ajuste axial y radial que permite a las espirales separarse en presencia de refrigerante líquido, proporcionando de esta forma protección adicional frente a los golpes de líquido. [17]

### **Evaporador:**

Es el dispositivo que se encarga de extraer el calor de la corriente de aire, consiguiendo, por tanto, que se enfríe. Con este fin, el flujo de refrigerante se acaba evaporando por absorción de calor.

Debido a que el refrigerante se encuentra baja presión, el cambio de fase se produce a baja temperatura, por lo que la corriente de aire que se desea enfriar está más caliente y por ello se hace posible el intercambio térmico.

El evaporador es el componente que se encuentra entre la válvula de expansión, de la que sale vapor saturado con muy poco título (ya que se encuentra a temperatura y presión de saturación), y descarga en la aspiración del compresor.

### **Condensador:**

El condensador es el componente del ciclo que se encarga de disipar el calor que absorbe el evaporador y que cede el compresor. Por tanto, se trata de un intercambiador de calor, en el cual se produce el cambio de estado de gas a líquido del refrigerante.

El tipo de condensadores que más se utilizan son los refrigerados por aire. Estos están formados por un serpentín por el que circula el refrigerante que sirve de foco frío y un ventilador con su correspondiente motor.

Para el caso de una superficie constante de intercambio de calor, si aumenta la temperatura del aire, esto dará lugar a una disminución del calor intercambiado. En la siguiente figura se muestra la variación de temperaturas a lo largo del intercambiador.

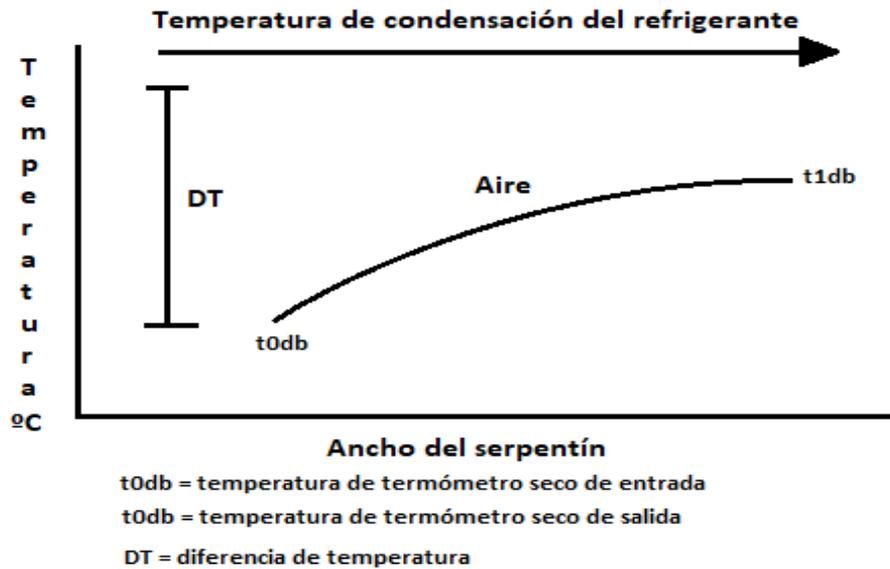


Figura 26: Condensación con refrigeración por aire. Carrier. (2009)

## Gas refrigerante:

El fluido que pasa por los componentes expuestos en el ciclo de compresión para bomba de calor es el refrigerante. Éste debe de cumplir unos requisitos químicos, físicos y termodinámicos, así como medioambientales y de seguridad. El refrigerante a utilizar se debe elegir en función de sus características que se exponen a continuación:

### Propiedades físicas:

Estas dependen de la temperatura, aunque a veces se consideran constantes para un intervalo dado.

- *Conductividad:* Debe ser alta, para disminuir las superficies de intercambio de calor.
- *Viscosidad:* La eficiencia mejorará cuanto menor sea la viscosidad ya que reducirá las pérdidas de carga en las tuberías.

### Propiedades químicas:

- *Estabilidad:* Una sustancia estable dura más y es inerte, por lo que la corrosión será un problema menos. De cualquier forma, dificulta su destrucción, lo que puede ser un gran inconveniente si es tóxica o peligrosa para el medio ambiente.
- *Compatibilidad con materiales y lubricantes:* para asegurar su duración.
- *Solubilidad con agua:* Será baja, para evitar problemas derivados de la corrosión.
- *Miscibilidad con el aceite:* Esto puede afectar a la transmisión de calor y a la lubricación del compresor.

### Propiedades termodinámicas:

- *Temperatura de congelación:* Deberá ser más baja que cualquier temperatura alcanzada durante el ciclo, para asegurar que no se congele.
- *Calor latente de vaporización:* Un calor latente elevado asegurará que el intercambio de calor en el evaporador no requiera de mucho caudal. Aunque un valor demasiado alto puede dificultar su control.
- *Presión de vaporización:* Se busca una presión superior a la atmosférica para evitar que entre aire del exterior al circuito. Esto facilitaría la corrosión de los componentes y disminuiría su eficiencia.
- *Presión de condensación:* Debe ser lo más baja posible, ya que de esta forma será más cercana a la presión de vaporización y el salto de presiones será menor lo que conlleva que el trabajo del compresor sea menor y más eficiente.
- *Temperatura crítica:* Ésta debe ser elevada, ya que determina el límite de enfriamiento con cambio de fase.
- *Volumen específico:* Éste vendrá determinado por el tipo de compresor utilizado. Los compresores volumétricos requieren de valores pequeños, mientras que los centrífugos requieren de valores elevados.

### Seguridad y medio ambiente:

- *Toxicidad e inflamabilidad:* Estas características deben ser lo más bajas posibles. En caso contrario se llevarán a cabo las medidas de seguridad correspondientes. Para evaluar la seguridad se establecen tres grupos: L1 de máxima seguridad (A1), L2 de seguridad media (A2, B1, B2) y L3 de baja seguridad (A3, B3). La letra de

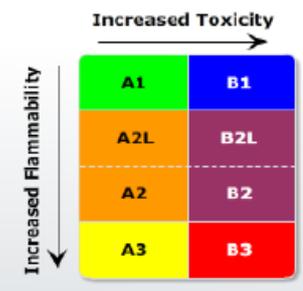
la anterior clasificación hace referencia a la toxicidad (A es el mejor valor) y el número está dado en función de su inflamabilidad.

- *Comportamiento ambiental:* Una gran cantidad de refrigerantes (como los CFCs y los HCFs) contribuyen a la destrucción de la capa de ozono cuando se descomponen por acción de la radiación ultravioleta. Muchos de ellos están restringidos. Se definen dos índices importantes:

-ODP o PAO: Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono.

-GWP o PCA: Potencial de Calentamiento Atmosférico, que valora que efecto invernadero provocado en un intervalo de tiempo.

Refrigerant type	Refrigerant	Name	Safety Groups
-	R717	Ammonia	B2L
-	R744	Carbon Dioxide	A1
HCFC	R22	Chlorodifluoromethane	A1
HFC	R134a	1,1,1,2-tetrafluoroethane	A1
HFC	R404A	R125/143a/134a (44/52/4)	A1
HFC	R407C	R32/125/134a (23/25/52)	A1
HFC	R410A	R32/125 (50/50)	A1
HFC	R507A	R125/143a (50/50)	A1
HFC	R152a	1,1-difluoroethane	A2
HC	R290	Propane	A3
HC	R600	Butane	A3
HC	R600a	Iso-butane	A3
HC	R1270	Propylene	A3



Source: ASHRAE 34-2010

Figura 27: Seguridad de refrigerantes. Fuente: HC Refrigerants

Para el sistema de extracción mediante condensación del EoleWater se utiliza como gas refrigerante el R-410A. Éste es una mezcla de gases azeotrópica desarrollada como sustituto con cero daños a la capa de ozono para el R-22. Este refrigerante es la opción preferida internacionalmente para equipos nuevos de aire acondicionado o para bombas de calor como es el caso. La gran ventaja del R-410A es su elevada capacidad frigorífica que puede resultar un 50% superior al R-22. Por ello se pueden utilizar máquinas más compactas en comparación con las que se utilizarían para el R-22.

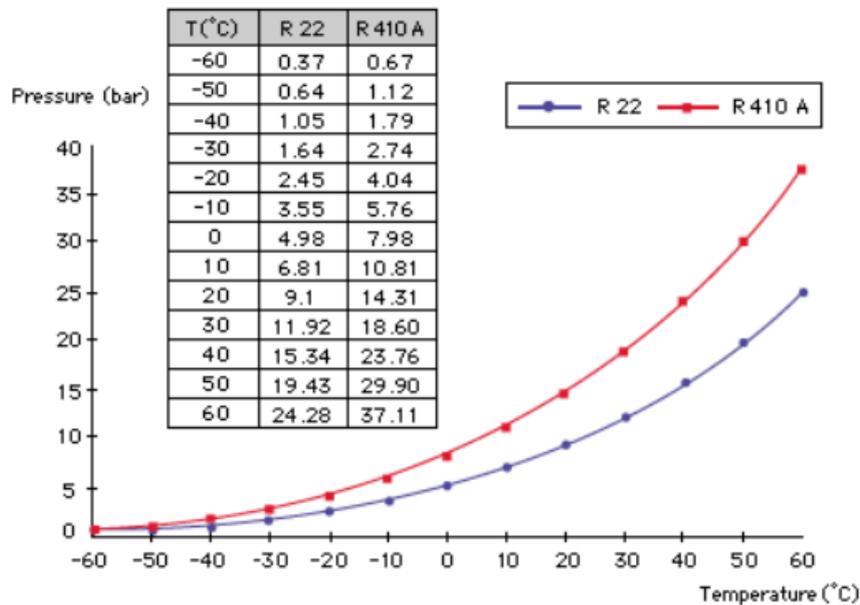


Figura 28: Gráfica comparativa  $T^a$ /presión R-22-R-410ª.

## Tratamiento de agua:

La OMS (Organización Mundial de la Salud) produce normas internacionales sobre la calidad del agua y la salud humana en forma de directrices que se utilizan como base para la regulación y el establecimiento de normas en todo el mundo.

Las Directrices para la calidad del agua potable (GDWQ) suscitan la protección de la salud pública promoviendo el desarrollo de normas y regulaciones locales relevantes (objetivos basados en la salud), adopción de enfoques de gestión de riesgos preventivos que abarcan la captación al consumidor (Planes de seguridad hídrica) y vigilancias independientes para asegurar que los Planes de Seguridad del Agua se estén implementando, sean efectivos y que se verifiquen los estándares nacionales.

Para que estas directrices se cumplan, se han seguido estos tratamientos para que el agua extraída esté en las mejores condiciones para su consumo:

- Filtración: Se filtran sólidos mediante membranas de 10µm.
- Adsorción en carbón activo: La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para quitar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie

interna muy grande (entre 500 - 1500 m<sup>2</sup>/g). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. [18]

- Ultrafiltración: Es un proceso de separación de membrana que permite la reducción de los sólidos suspendidos como partículas, coloides, quistes, bacterias y virus por medios mecánicos. Las membranas de ultrafiltración eliminan los sólidos suspendidos en base al tamaño del poro, en este caso de 0,005 µm. [19]
- Tratamiento ultravioleta: A diferencia de los métodos químicos para la desinfección de aguas, la luz ultravioleta proporciona una inactivación rápida y eficiente de los microorganismos mediante un proceso físico. Cuando las bacterias, los virus y los protozoos se exponen a las longitudes de onda germicidas de la luz UV, se vuelven incapaces de reproducirse e infectar. [20]
- Mineralización: Es el proceso por el que el agua obtiene minerales u otras sustancias disueltas que le confieren unas propiedades específicas y pueden alterar su sabor. Estas aguas minerales tienen origen subterráneo y tienen una composición mineral que depende de varios factores: el tipo de roca de la que proviene, el tiempo que permanece en el subsuelo y la temperatura que tiene en el origen. La pureza mineral y microbiológica hace que sea sana y que se conserve igual a lo largo del tiempo. Hoy en día se puede producir esta variedad de forma artificial, añadiendo los minerales que deseen. [21]

#### 9.4. Componente principal de la instalación de extracción de agua mediante la compresión

Para analizar qué compresor sería el óptimo para extraer la máxima cantidad de agua utilizando la menor energía posible utilizamos la relación l/kWh de cada una de las opciones. A continuación, se presenta una tabla de los distintos compresores de pistón lubricado que se han analizado con el fin de elegir el óptimo para el sistema:

	Litros/kWh PARA DIFERENTES COMPRESORES DE PISTÓN				
	BKT 119.500.15 T	CP 119.500.7,5 F AP	CP 20.500.10 F	CP 20.500.7,5 F	Concept 870.500
Caudal (m3/min)	1,68	0,689	1,21	0,96	0,84
Caudal (m3/h)	100,8	41,34	72,6	57,6	50,4
Presión max (bar)	10	14	10	10	10
Litros/día	28,02	12,13	20,18	16,01	14,01
Consumo compresor (CV)	14	7,5	10	7,5	7,5
Consumo Compresor (KW)	10,29	5,5125	7,35	5,5125	5,5125
Nº horas plena carga	2800	2800	2800	2800	2800
kWh/día consumidos	78,937	42,288	56,384	42,288	42,288
Litros/kWh	<b>0,3550</b>	<b>0,2869</b>	<b>0,3580</b>	<b>0,3787</b>	<b>0,3313</b>
Peso (kg)	275	205	250	236	265

Tabla 8: l/kWh para diferentes compresores de pistón

Por lo que se puede apreciar en la tabla, el modelo “CP 20.500.7,5” es el dispositivo que mayor cantidad de agua puede extraer por cada kWh consumido. Debido a que la relación de este compresor es la mejor de las opciones analizadas, podemos afirmar que consumiremos menos energía de la que se consigue gracias al viento para extraer la misma cantidad de agua que otros compresores del mismo tipo. [22]

Partiendo de los 2000 kW de potencia que proporciona el aerogenerador de Gamesa, se podrá aprovechar parte de esa energía para hacer funcionar el compresor, y el resto de energía se destinará al abastecimiento eléctrico como se venía haciendo con los aerogeneradores convencionales.

Dado que el gasto de energía que supone hacer funcionar el compresor es de 42,288 kWh/día a plena carga y el aerogenerador G80/2000 proporciona 48000 kWh/día se aprovecharía esa energía restante para producir electricidad. Es decir, se podrían generar 47957,712 kWh/día a plena carga.

Otra alternativa para sacar mayor provecho de toda esa energía que se utiliza para conseguir electricidad sería acoplar al aerogenerador dos compresores en vez de uno. De esta forma se podrían extraer más de 30 litros/día en vez de cerca de los 16 mediante un solo compresor.

Se ha podido observar que estos compresores, aun no pudiendo extraer demasiada cantidad de agua por su capacidad, tienen unas dimensiones aceptables para ser insertados dentro de los aerogeneradores o incluso acoplarlos una “mochila” a éstos.

Debido a que este trabajo no tiene en cuenta el diseño estructural del acoplamiento del sistema se van a proporcionar unos compresores de tornillo, los cuales admiten una cantidad de aire significativamente mayor que los anteriores. Estos nuevos, aun teniendo en cuenta que son más grandes y su peso es considerablemente mayor que los anteriores, seguiría siendo posible su acoplamiento si los comparamos con el peso de la propia góndola. [23]

Litros/kWh PARA DIFERENTES COMPRESORES DE TORNILLO				
	Diessel Portable Air compressor DACY-45/10	Screw Air Compressor DA-355(W)+	Direct Driven Screw Air Compressor	Dry Oil-free Air Compressor DWW-355W
Caudal (m3/min)	47,77	72,70	67,47	51,12
Caudal (m3/h)	2866,20	4362,00	4048,20	3067,20
Presión max (bar)	10,00	7,50	7,50	10,00
Litros/día	796,85	1134,03	1052,45	852,73
Consumo compresor (CV)	564,63	482,99	510,20	482,99
Consumo Compresor (kW)	415,00	355,00	375,00	355,00
Nº horas plena carga	2800,00	2800,00	2800,00	2800,00
kWh/día consumidos	3183,56	2723,29	2876,69	2723,29
Litros/kWh	<b>0,25</b>	<b>0,42</b>	<b>0,37</b>	<b>0,31</b>
Peso (kg)	6500	8500	8500	5300

Tabla 9: l/kWh para diferentes compresores de gran caudal de admisión.

Tras los resultados obtenidos en estas tablas sobre compresores de mayor admisión de caudal, se puede observar que la cantidad de agua que se extrae al día en función de lo que gastan para dicha operación no es significativamente mayor que los compresores anteriores que admitían menor caudal de aire y consecuentemente consiguen menor cantidad de agua.

Por lo tanto, podemos sacar como conclusiones respecto de los compresores, que, si no existen problemas de diseño estructural o de peso al acoplarlos al aerogenerador serán

mejores estos últimos compresores descritos, escogiendo el que mejor relación litros/kWh posee, es decir, el modelo Screw Air Compressor DA-355(W)+.

Se ha pensado realizarlo el acoplamiento del aerogenerador en la parte superior de la góndola en caso de ser el compresor muy pesado el compresor para no interferir en el montaje habitual donde se sitúan la multiplicadora, el generador, etc. Únicamente habría que variar la altura del anemómetro y los pararrayos para que el acoplamiento no interfiriese en un funcionamiento.

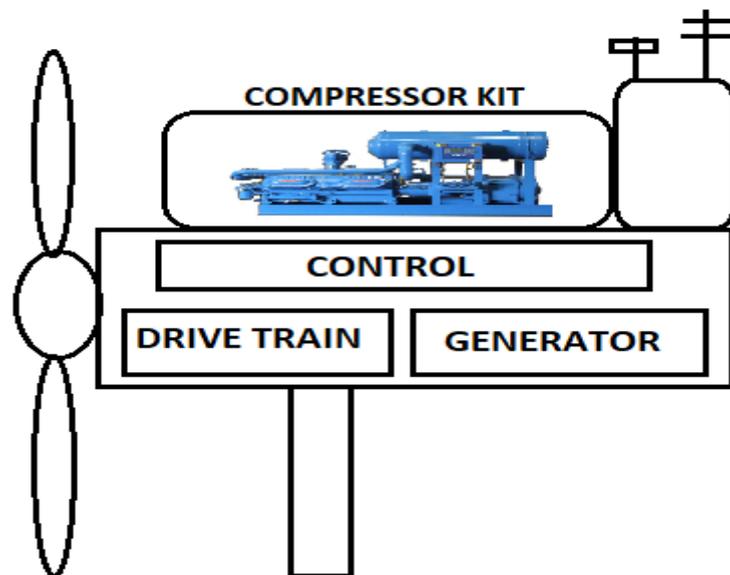


Figura 29: Posibilidad de acoplamiento del sistema de compresión.

Otra posibilidad podría ser crear un acoplamiento lateral de la góndola donde no habría que cambiar ninguna otra parte de la instalación. Esta idea se implantaría únicamente con compresores de bajo peso para no entrar en un conflicto de tensiones estructurales. Dado que no es objeto de este trabajo se dejan planteadas las ideas para un posible montaje futuro.

## 10. Análisis de viabilidad técnica

En este apartado se va a realizar un análisis sobre la relación que existe entre la cantidad de agua que es extraída y la cantidad de energía que es necesaria emplear para obtener dicho objetivo para cada una de las tecnologías.

Por una parte, se considerará esta relación descrita en base a la disminución de temperatura que se debe dar durante el proceso de enfriamiento para que el aire húmedo se condense.

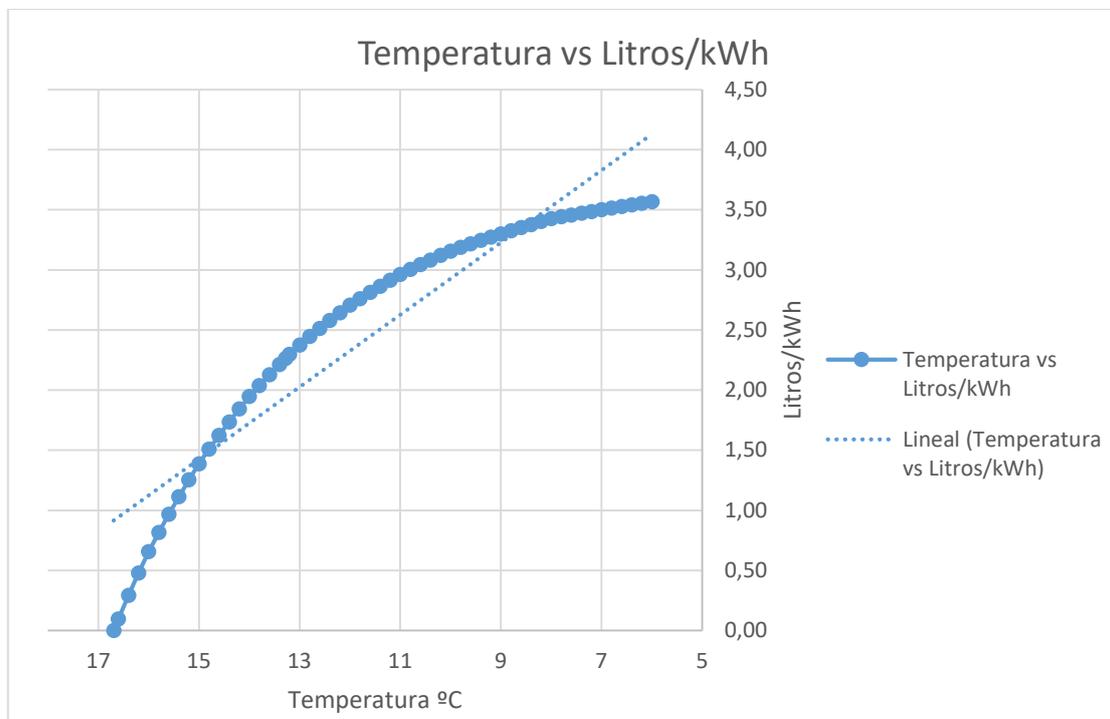


Figura 30: Gráfico de relación entre temperatura y litros/kWh para el sistema de enfriamiento.

Como podemos comprobar en la figura nº 30, a partir de los 9°C aproximadamente la cantidad de agua extraída es mucho menor en comparación con la que se condensa desde los iniciales 25°C hasta estos últimos 9°C. Esto es debido al grado de humedad que existe cuando la temperatura ha disminuido una cantidad suficiente de grados lo cual significa una cantidad menor de vapor en el ambiente. Por lo tanto, no merece la pena enriar el aire

a partir de dicha temperatura ya que se necesitará seguir empleando energía para extraer una cantidad que no aporta demasiado beneficio.

El siguiente gráfico que se muestra a continuación presenta la relación existente entre la presión a la que debe comprimirse el caudal de entrada y los litros de agua que se consiguen por cada kWh gastado para hacer posible el proceso. Dicho gráfico se ha realizado para uno de los compresores anteriormente expuestos, en concreto el Screw Air Compressor DA-355(W)+. En él se mantiene constante el caudal de entrada de 4362 m<sup>3</sup>/h y se varía la presión hasta su máxima de 7,5 bares.

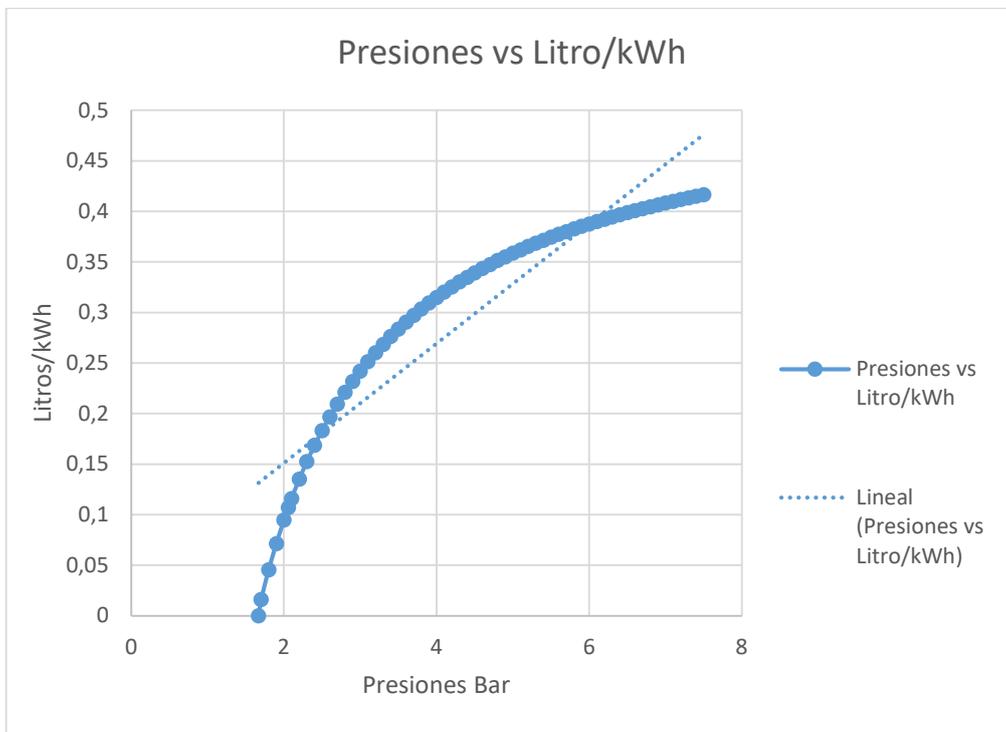


Figura 31: Gráfico de relación entre presión y litros/kWh para el sistema de compresión adiabática

Tras ver ambos gráficos y teniendo en cuenta la escala a la que se están expuestos los datos de ambos procesos, se puede ver cómo la línea de tendencia del sistema de enfriamiento tiene una pendiente mucho más pronunciada. Lo que nos indica que se puede extraer una cantidad de agua notablemente superior al proceso adiabático por cada kWh empleado para ello.

Para ver de forma más clara que el proceso de enfriamiento es el más óptimo de los dos se presenta en la siguiente gráfica una comparativa entre la cantidad de agua para cada sistema en su punto óptimo de funcionamiento, el cual se ve influenciado por el caudal de admisión del aire húmedo que incluye el vapor de agua a extraer:

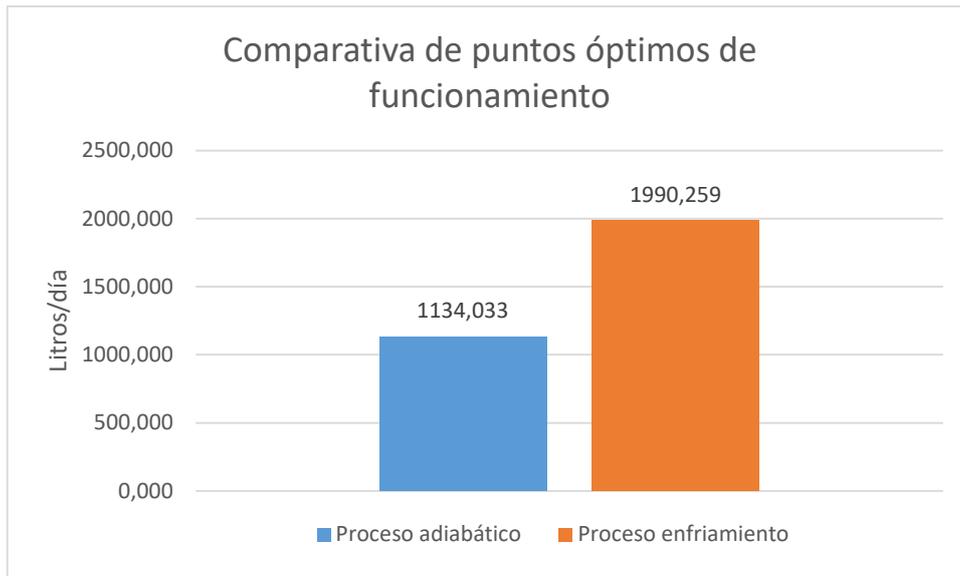


Figura 32: Comparativa de puntos óptimos de funcionamiento

## 11. Descripción de las tareas Gantt

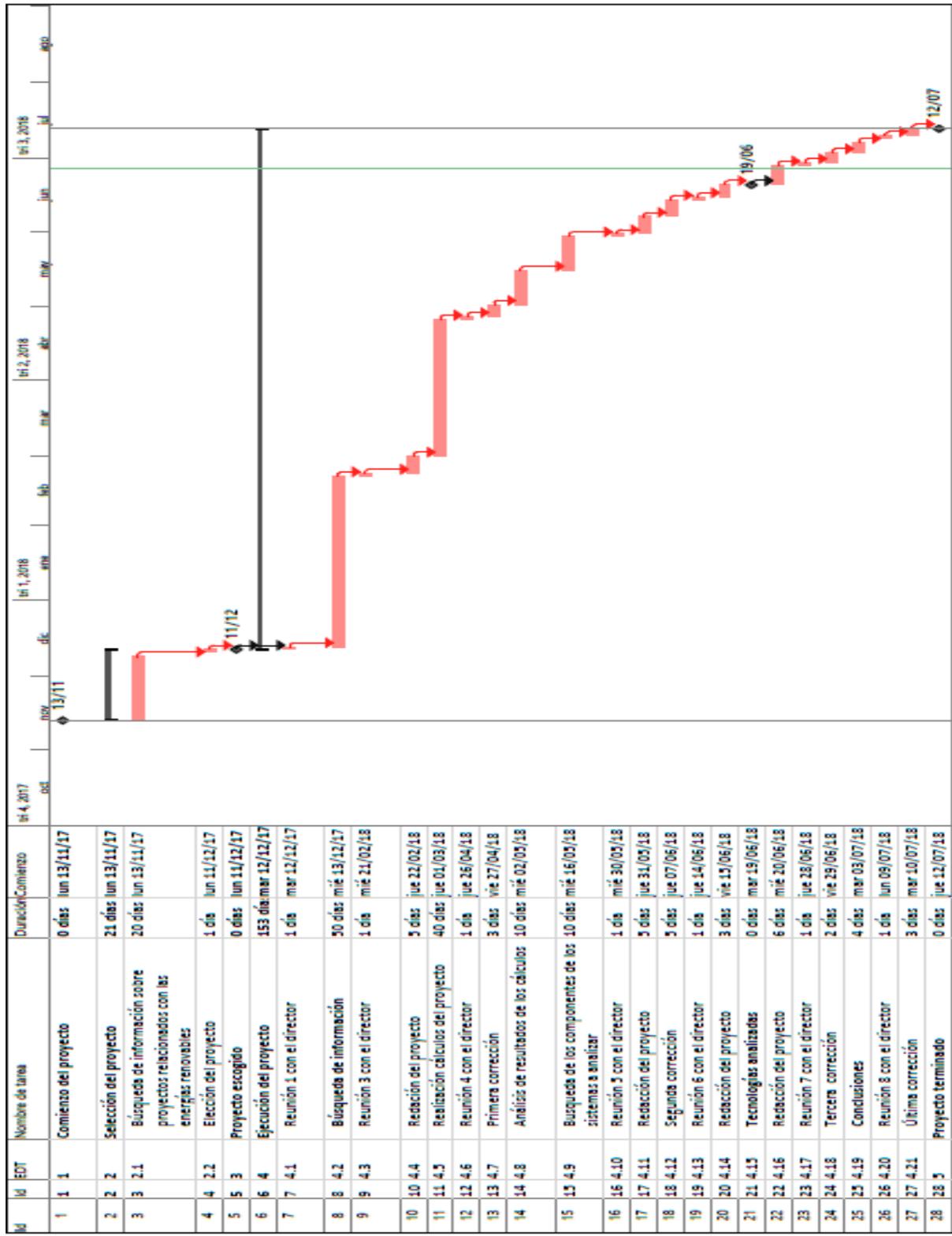


Figura 33: Diagrama Gantt

## 12. Presupuesto

**Horas internas:** Las horas internas que ha empleado el alumno en el proyecto, que se contabilizarán como horas internas de un ingeniero industrial para el que su salario asciende a 40 €/h para una cantidad de horas trabajadas de aproximadamente 1600 durante todo el proyecto. Para el director de proyecto que ha dirigido de cerca el progreso del mismo se le adjudica un salario de 70 €/h, para un tiempo de trabajo aproximado de 200 horas durante la totalidad del proyecto.

Concepto	Precio unitario	Número de horas	Subtotal
<b>Ingeniero Junior</b>	40 €	300	12.000 €
<b>Ingeniero Senior</b>	100 €	50	5.000 €
<b>Coste total</b>			17.000 €

Tabla 10: Resumen de horas internas

**Amortizaciones:** En lo que respecta al apartado de amortizaciones aparecerán los recursos utilizados por el ingeniero para el desarrollo del trabajo, los cuales se especificarán a continuación junto a su precio, vida útil y el número de horas utilizado aproximadamente para el uso de cálculos, análisis y otras tareas correspondientes a la consecución del trabajo fin de grado.

Concepto	Precio unitario	Uso	Vida útil	Subtotal
Licencia Microsoft office (Excel)	432 €	900 h	26.280 h	14,79 €
Licencia Microsoft Project Pro 2016	417€	50 h	26.280 h	0,79
Ordenador	1.200 €	1600 h	26.280 h	73,06 €
<b>Coste total</b>				88,65 €

Tabla 11: Resumen de amortizaciones

**Gastos:** En lo referente a los gastos, se registrarán en este apartado el coste de los gastos que supone el proyecto en lo referido a la bibliografía utilizada y material de oficina utilizado para su consecución.

Concepto	Coste
Bibliografía (libros y artículos técnicos)	300,00 €
Material de oficina	100,00 €
<b>Coste total</b>	<b>400,00 €</b>

Tabla 12: Resumen de gastos

**Total:** En este apartado de resumirán las horas internas totales, amortizaciones y la partida de costes indirectos que supondrán un 5% del subtotal del proyecto.

Partida	Coste
Horas internas	17.000 €
Amortizaciones	88,65 €
Gastos	400,00 €
Subcontrataciones	0 €
Subtotal	17.488,65 €
Costes indirectos (5%)	874,43 €
<b>TOTAL</b>	<b>18.363,08 €</b>

Tabla 13: Resumen del presupuesto

El coste total del proyecto ascenderá a 88.713,08 €. Como se muestra en el siguiente gráfico se puede apreciar que el proyecto está casi en su totalidad compuesto de las horas internas, con el resto de gastos asumidos prácticamente en los costes indirectos.

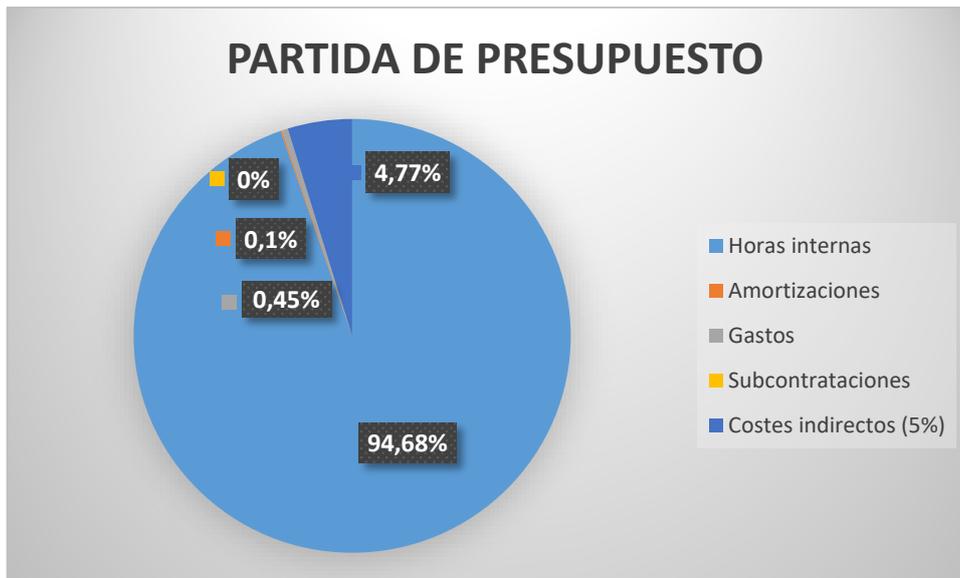


Figura 34: Gráfico de presupuesto

## 13. Análisis de riesgos

Para realizar la gestión de los riesgos, se adoptarán los siguientes pasos [24]:

- Identificación de los riesgos
- Evaluar la probabilidad de cada factor de riesgo
- Evaluar el impacto de cada factor de riesgo
- Priorizar riesgos
- Desarrollar respuesta

### 13.1. Identificación de los riesgos

A lo largo del análisis de estas dos propuestas de extracción de agua se podrían encontrar algunos problemas a la hora de su implantación y diseño que se redactan a continuación:

- 1) Climatología adversa relativo a humedad, temperatura o velocidad del viento → Riesgo A
- 2) Rotura o avería de maquinaria como el compresor, intercambiador de calor, conductos de refrigerante. → Riesgo B
- 3) Obturación del filtro de entrada al sistema. → Riesgo C
- 4) Excesivo nivel de ruido en el/los compresores. → Riesgo D
- 5) Fallos en el sistema eléctrico de salida del aerogenerador. → Riesgo E
- 6) Avería en el canal de extracción de agua de la góndola al depósito. → Riesgo F
- 7) Fallo en los procesos de tratamiento de agua. → Riesgo G
- 8) Accidente laboral. → Riesgo H

### 13.2. Evaluar la probabilidad de cada factor de riesgo

Para la realización de este apartado se contará con el uso de unos criterios y unos coeficientes. Todos los riesgos se evaluarán en una escala de 1-5; siendo el 1, “Raramente”; y el 5, “Casi seguro”.

- Raramente (1)
- Difícilmente (2)
- Posible (3)
- Probable (4)
- Casi seguro (5)

Por lo tanto, siguiendo estos criterios la serie de factores de riesgo descritos en el apartado anterior adquieren los siguientes coeficientes:

- Riesgo A → Posible (3)
- Riesgo B → Difícilmente (2)
- Riesgo C → Probable (4)
- Riesgo D → Posible (3)
- Riesgo E → Difícilmente (2)
- Riesgo F → Raramente (1)
- Riesgo G → Probable (4)
- Riesgo H → Raramente (1)

### 13.3. Evaluar el impacto de cada factor de riesgo

Como en el apartado anterior se usarán una serie de coeficientes y criterios para evaluar este apartado. Se seguirá evaluando en una escala de 1 a 5; siendo el 1 impacto muy bajo y el 5 impacto muy alto.

- Impacto muy bajo (1)
- Impacto bajo (2)
- Impacto moderado (3)
- Impacto alto (4)
- Impacto muy alto (5)

A continuación, se procederá a evaluar los factores de riesgos según los criterios descritos:

- Riesgo A → Impacto muy alto (5)
- Riesgo B → Impacto muy alto (5)

- Riesgo C → Impacto alto (4)
- Riesgo D → Impacto alto (4)
- Riesgo E → Impacto alto (4)
- Riesgo F → Impacto moderado (3)
- Riesgo G → Impacto alto (4)
- Riesgo H → Impacto moderado (3)

### 13.4. Priorizar los riesgos

Este apartado se realizará a través de la matriz probabilidad-impacto. Con ella se sacarán conclusiones sobre los riesgos que hay que tener más vigilados y actuar sobre ellos de la manera más adecuada según el criterio de cada riesgo.

		IMPACTO				
		MUY BAJO (1)	BAJO (2)	MEDIO (3)	ALTO (4)	MUY ALTO (5)
PROBABILIDAD	RARAMENTE (1)			F, H		
	DIFICILMENTE (2)				E	B
	POSIBLE (3)				D	A
	PROBABLE(4)				C, G	
	CASI SEGURO (5)					

Tabla 14: Impacto probabilidad

### 13.5. Desarrollar la respuesta

Como se puede observar en el apartado anterior, los riesgos que hay que tener más en cuenta son los riesgos A, C y G correspondientes a la climatología, a la entrada de aire al sistema y al tratamiento de agua que se consigue extraer, respectivamente. Los siguientes factores de riesgos a tener más vigilados son: el B, posible rotura o avería de maquinaria;

el E, fallos en el sistema eléctrico de salida del aerogenerador; y el D, correspondiente al nivel de ruido que proporciona el sistema durante su ejecución. Al final los factores de riesgo que se han considerado menos importantes han resultado ser el F, correspondiente a una avería en el canal de extracción de agua de la góndola al depósito debido a su baja probabilidad; y por último el H, accidente laboral

#### ❖ RIESGO A: Problemas derivados de la climatología

Los datos extraídos mediante análisis realizados en la zona en los últimos años nos permiten conseguir una media de las condiciones climatológicas a las que operarán de forma óptima los sistemas, pero estas condiciones no serán siempre óptimas por lo que en periodos de bajas velocidades de viento o de condiciones de humedad y temperatura fuera de los rangos óptimos, los rendimientos disminuirán. Por lo que para optimizar la función del aerogenerador se procederá a, en condiciones de baja productividad parar el sistema ya que, en estos sistemas de aprovechamiento de la energía del viento a bajas velocidades resulta poco rentable mantenerlos activos.

#### ❖ RIESGO B: Rotura o avería de maquinaria

Este riesgo a través de la matriz impacto-probabilidad se ha visto que es uno de los riesgos que más impacto podría tener en caso de aparecer, aunque es uno de los que menos probabilidad de ocurrencias tiene. Por eso, se optará por una aceptación del riesgo de forma pasiva, la cual incluye una revisión de las máquinas antes de empezar la vendimia y un continuo mantenimiento preventivo sobre ellas durante las fases del proyecto que estén involucradas.

#### ❖ RIESGO C: Obturación del filtro de entrada del aire

Al igual que riesgo B su impacto en el proyecto no es notablemente significativo debido a que no ocurre frecuentemente. Este riesgo se aceptará y se intentará disminuir realizando una inspección periódica semestral para comprobar que entra el flujo suficiente de aire para obtener las cantidades de agua deseadas para cada sistema.

### ❖ RIESGO D: Ruido

Este es un riesgo que deberemos asumir ya que no conseguiremos mitigar toda la carga sonora que conlleva el proceso de compresión. Para disminuir el riesgo se instalarán válvulas de laminación para disminuir la presión del aire a la salida del sistema. Esto evitará que el nivel de decibelios que generaría el sistema disminuya considerablemente y por lo tanto sería un alivio para los ciudadanos de las zonas cercanas.

### ❖ RIESGO E: Fallo en el sistema eléctrico de salida

A este riesgo se le da una importancia relativamente alta debido a que, si existe un fallo importante en el sistema eléctrico, la energía generada no llegará a los puntos de destino. Se intentará solucionar o minimizar este riesgo mediante sistemas fiables de seguridad y emergencia en caso de fallo, así como efectuar controles cada cierto tiempo por especialistas y según las especificaciones requeridas para la seguridad tanto del sistema como de los trabajadores involucrados en el mismo.

### ❖ RIESGO F: Avería en el canal de extracción de agua de la góndola al depósito

Es un riesgo que será poco probable encontrar en el sistema debido a que se trata básicamente una tubería por donde se extrae el agua por gravedad. Aunque, en el caso de haber un mal acoplamiento al depósito, puede escaparse agua, lo que supondría pérdidas en uno de los bienes básicos del proyecto. No es un riesgo en el que debemos centrarnos especialmente ya que con buenos materiales anti fuga y unas revisiones semestrales será suficiente para prevenirlo.

### ❖ RIESGO G: Fallo en los procesos de tratamiento de agua

La potabilización del agua o al menos su desinfección, filtración y fluoración será imprescindible para proporcionar un producto mínimamente aprovechable a los consumidores. Es un tratamiento que necesita una vigilancia periódica para que la calidad no se deteriore en ningún momento, sobre todo a sabiendas de las condiciones en las que nos encontramos en dicha región desértica. Se procederá a hacer revisiones habituales por operarios que puedan estar cerca de la zona y analizar las muestras para comprobar que todo está dentro de los baremos permitidos.

### ❖ RIESGO H: Accidente laboral

En cualquier actividad que esté dentro del proyecto, ya sea, mantenimiento, supervisión u otras, la seguridad del trabajador es lo más importante, por eso se contrataría un seguro de responsabilidad civil que engloba todos los posibles accidentes que se puedan dar en el proyecto debido a maquinaria, fallo humano o razones logísticas. Aun así, su implicación va a ser de mero mantenimiento periódico, por eso se ha establecido como riesgo con probabilidad muy baja.

## **14. Conclusiones**

Una vez realizado el análisis en cuestión, se han podido sacar una serie de conclusiones que se expondrán a continuación.

Por un lado, se ha demostrado que el sistema “EoleWater” de enfriamiento de aire húmedo para conseguir la condensación del vapor que éste contiene, trabaja bajo unas condiciones que se dan en una gran variedad de regiones del planeta. La cantidad de agua que este sistema puede extraer puede alcanzar fácilmente los 1000 litros de agua al día pudiéndose llegar a conseguir más cantidad con un mayor aporte de energía que el sistema hasta ahora trabajado.

Debido a que la energía que estos sistemas necesitan para comprimir el aire atmosférico no es significativamente alta en comparación con la energía que produce el propio aerogenerador para convertirla directamente en electricidad, no supondría un problema energético el acoplamiento de estos sistemas al propio aerogenerador.

Por otro lado, tras analizar la alternativa propuesta para conseguir el mismo objetivo, en base a los resultados obtenidos se ha podido comprobar que los litros de agua por día que se podrían aprovechar a partir de este proceso sería capaz de competir con el sistema de enfriamiento.

Como se ha podido observar en los gráficos de los apartados anteriores, llega una situación en la que gastar energía para enfriar o comprimir más el aire no saldría rentable debido al poco beneficio que se extrae en caso de hacerlo. Además, con el caudal máximo de admisión para cada sistema y para la temperatura y presión de su punto óptimo, se deduce que el sistema de enfriamiento consigue mejores resultados que el de compresión con la tecnología que hay hoy en día desarrollada.

Asimismo, la implantación de un sistema de compresión en la góndola del aerogenerador para mantener unos niveles de extracción deseados supondría también un aumento de peso considerable y una posible desestabilización de la instalación. Por este motivo se debería pensar en implantar este sistema con una mayor cantidad de compresores de menor caudal de admisión y aprovechar el número de aerogeneradores que se encuentran actualmente en uso para su acoplamiento.

## 15. Bibliografía

- [1] The USGS Water Science School. (02 dic 2016) The World's Water. Recuperado (Enero 2018), de <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>
- [2] Egiptodreams. (25 jun 2018) Hidrografía de Egipto. Recuperado ( Enero 2018) de <http://www.egiptodreams.com/Gfisica.htm>
- [3] Mónica G. Prieto. (01 jul 2008) Guerra por el agua en Egipto. Recuperado (Enero 2018) de <http://www.elmundo.es/elmundo/2008/07/01/internacional/1214910602.html>
- [4] Inter Press Service. (10 sep 2009) Energía-Egipto: Vientos del desierto renuevan esperanza. Recuperado (Enero 2018) de <http://www.ipsnoticias.net/2009/09/energia-egipto-vientos-del-desierto-renuevan-esperanza/>
- [5] WindFinder. (31 ene 2011) Estadísticas Zafarana. Recuperado (Enero 2018) de <https://es.windfinder.com/windstatistics/zafarana>
- [6] La psicrometría. (18 may 2018) Psicrometría. Recuperado (Febrero 2018) de <http://www.herdkp.com.pe/adds/info/lapsicrometria.htm>
- [7] International. (20 feb 2016) Humedad relativa. Recuperado (Febrero 2018) de <http://www.yachtpaint.com/esp/diy/ask-the-experts/qu%C3%A9-es-la-humedad-relativa.aspx>
- [8] EcuRed. (19 abr 2018) Humedad del aire. Recuperado (Febrero 2018) de [https://www.ecured.cu/Humedad\\_del\\_aire](https://www.ecured.cu/Humedad_del_aire)
- [9] Ammonit. (3 mar 2018) Energía eólica. Recuperado (Febrero 2018) de <http://www.ammonit.com/es/informacion-eolica/energia-eolica>
- [10] Danish Wind Industry Association. (7 may 2003) Rugosidad y cizallamiento. Recuperado (Febrero 2018) de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/shear.htm>
- [11] Flighlights. (11 jul 2017) Cizalladura. Recuperado (Marzo 2018) [http://www.aviadores.eu/virajes\\_cizalladura.html](http://www.aviadores.eu/virajes_cizalladura.html)

- [12] RealAcademia de Ingeniería. (10 ene 2018) Cizalladura del viento. Recuperado (Marzo 2018) de <http://diccionario.raing.es/es/lema/cizalladura-del-viento>
- [13] Material docente del “*Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad del País Vasco*” (2018)
- [14] Mundo compresor. (14 jun 2017) Compresor de tornillo lubricado. Recuperado (Marzo 2018) de <https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/como-funciona-compresor-tornillo-lubricado>
- [15] Index. (14 may 2014) El uso del agua. Recuperado (Marzo 2018) de [http://www.agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion\\_ambiental/educ/publicaciones/ciclo\\_del\\_agua/cicag/3/3\\_1\\_2/index.html](http://www.agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_del_agua/cicag/3/3_1_2/index.html)
- [16] Emerson. (23 feb 2016) Compresores Copeland Scroll. Recuperado (Abril 2018) de [http://www.emersonclimate.com/europe/es-eu/products/compressors/scroll\\_compressors/pages/default.aspx](http://www.emersonclimate.com/europe/es-eu/products/compressors/scroll_compressors/pages/default.aspx)
- [17] Lentech. (4 mar 2017) Adsorción/Carbón activo. Recuperado (Mayo 2018) de <https://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm>
- [18] Pentair. (17 abr 2015) Guía de aplicaciones de ultrafiltración Freshpoint. Recuperado (Mayo 2018) de <http://waterpurification.pentair.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/42680-s.pdf> (Mayo 2018)
- [19] TrojanUV. (20 feb 2018) Desinfección por UV. Recuperado (Mayo 2018) de <http://www.trojanuv.com/es/uv-basics>
- [20] Caldaria. (3 mar 2017) Mineralización del agua. Recuperado (Mayo 2018) de <http://www.caldaria.es/mineralizacion-agua/>
- [21] *Pedro Fernández Díez. (2000). Libro de termodinámica técnica. Aire acondicionado. XV. -446 de* <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=2>
- [22] CompresoresLOR. (5 jun 2017) Compresores pistón lubricado. Recuperado (Junio 2018) de [https://www.compresoreslor.es/venta-2?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=S00156634&utm\\_term=venta\\_compresores](https://www.compresoreslor.es/venta-2?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=S00156634&utm_term=venta_compresores)

[23] Denair. (7 dic 2006) Compresores de aire. Recuperado (Junio 2018) de [http://www.denair.net/air\\_compressor/?gclid=CjwKCAjwgYPZBRBoEiwA2XeupU2Y MZ32FcUx-8s6WU2Hm4j7ZE9n-9XkJcQIBUWoe7Tf6868I3hc3BoCshEQAvD\\_BwE](http://www.denair.net/air_compressor/?gclid=CjwKCAjwgYPZBRBoEiwA2XeupU2Y MZ32FcUx-8s6WU2Hm4j7ZE9n-9XkJcQIBUWoe7Tf6868I3hc3BoCshEQAvD_BwE)

[24] *Material docente del departamento de “Proyectos y expresión gráfica”. 2018*

## 16. Anexo I: Planos de conjunto. Esquemas y fichas técnicas

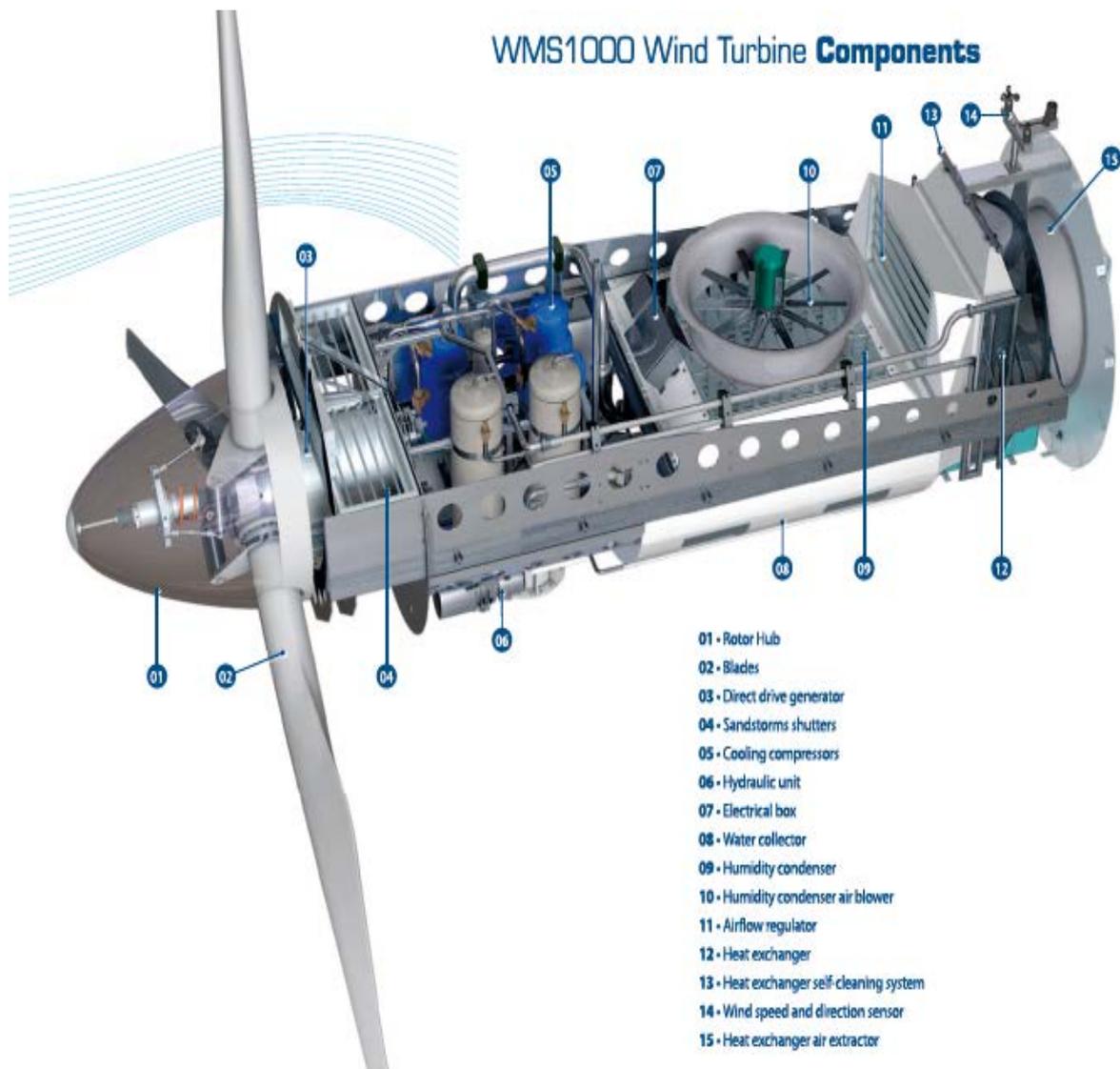


Figura 35: Esquema detallado del sistema "EoleWater"

# WMS1000 Wind Turbine **Technical Specifications**

## GENERAL

<b>Type</b>	Horizontal axis, upwind, 3 blades
<b>Rated power</b>	30 kW
<b>Hub height</b>	24 m
<b>Nominal wind speed</b>	10 m/s
<b>Minimal wind speed</b>	7 m/s for water production
<b>Maximum wind speed</b>	50 m/s

## ROTOR

<b>Diameter</b>	13 m
<b>Nominal rotation speed</b>	100 RPM
<b>Blade material</b>	Fibreglass and epoxy resin
<b>Regulation</b>	Pitch centrifugal control
<b>Brakes</b>	Hydraulic disc brake
<b>Generator</b>	Permanent Magnet - direct drive 400 VAC

## YAW CONTROL SYSTEM

<b>Type</b>	Active
<b>Driving motor</b>	Asynchronous motor
<b>Brakes</b>	Disc brake
<b>Slewing ring</b>	4 contact points balls

## CONTROL & MONITORING

<b>Monitoring</b>	Programmable Logic Controller
<b>Communication</b>	GSM data transmission and broadband
<b>Human/Machine Interface</b>	Touchscreen - data archiving

## Water production in various conditions

Zones	Conditions	WMS1000	WMS1000 + solar PV
Tempered zone	25°C - 60% HR	1000 l/day	1500 l/day
Costal zone	30°C - 70% HR	1200 l/day	1800 l/day
Arid mountain zone	25°C - 40% HR	750 l/day	1150 l/day
Desert zone	35°C - 30% HR	350 l/day	550 l/day

## Water maker system description

<b>Compressor unit</b>	2 x 15 kW SCROLL
<b>Refrigerant gas</b>	R410A (CFC FREE)
<b>Air flow generator</b>	2 x 15000 m <sup>3</sup> /h
<b>Humidity condenser</b>	Food safe stainless steel
<b>Heat exchanger</b>	Anti corrosion treated aluminium and cooper
<b>Regulation</b>	Programmable Logic Controller Electronically driven expansion
<b>Water treatment</b>	Filtration 10 μ Carbon block filtration 1 μ Ultra filtration 0.005 μ Ultraviolet treatment Mineralization cartridge

Figura 36: Ficha técnica "EoleWater"

## **17. Anexo II: Directrices de la OMS para la calidad del agua potable**

Elemento/sustancia	Símbolo/fórmula	Valores normales en aguas dulces/superficiales/subterráneas	Directriz de la OMS basada en la salud
Aluminio	Al		0,2 mg/l
Amonio	NH <sub>4</sub>	< 0,2 mg/l	
Antimonio	Sb	< 4 µg/l	0,005 mg/l
Arsénico	As		0,01 mg/l
Bario	Ba		0,3 mg/l
Berilio	Be	< 1 µg/l	
Boro	B	< 1 mg/l	0,3 mg/l
Cadmio	Cd	< 1 mg/l	0,003 mg/l
Cloro	Cl		250 mg/l
Cromo	Cr	< 2 µg/l	0,05 mg/l
Cobre	Cu		2 mg/l
Cianuro	CN		0,07 mg/l
Fluor	F	< 1,5 mg/l	1,5 mg/l
Hierro	Fe		
Plomo	Pb	0,5 - 50 mg/l	0,01 mg/l
Manganeso	Mn		0,5 mg/l
Mercurio	Hg		0,001 mg/l
Molibdeno	Mo	< 0,5 µg/l	0,07 mg/l
Niquel	Ni	< 0,01 mg/l	0,02 mg/l
Nitratos y nitritos	NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub>	< 0,02 mg/l	50 mg/l
Selenio	Se		0,01 mg/l
Plata	Ag	<< 0,01 mg/l	
Sodio	Na	5 - 50 µg/l	200 mg/l
Sulfato	SO <sub>4</sub>	< 20 mg/l	500 mg/l
Uranio	U		1,4 mg/l
Zinc	Zn		3 mg/l

Tabla 15: Directrices de la OMS para la calidad del agua potable, establecidas en Génova, 1993