



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un sistema de evaporación natural empleando un tejido natural de bambú para el tratamiento de aguas salobres.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Vosse Moreno, Yojan

Tutor/a: López Pérez, Maria Fernanda

Cotutor/a externo: López Borrell, Alexis

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

Las aguas salobres son un residuo que han de ser tratadas por su posible contaminación de agua dulce, suelos, ecosistemas y fauna circundantes. El uso de la evaporación natural asistida brinda la oportunidad de tratar estos residuos con un menor consumo energético.

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño y análisis de un sistema de evaporación natural utilizando tejido de bambú como medio de evaporación. Se emplearon datos climatológicos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento que permitiesen diseñar el sistema de evaporación para el tratamiento de aguas salobres en condiciones de operación controladas.

El objetivo del estudio fue corroborar un modelo matemático que relacionará los parámetros climáticos con la tasa de evaporación de agua salobre a través de un tejido de bambú. Para ello, se realizó un estudio de las condiciones climáticas de Cocentaina, con esta información se llevaron a cabo un conjunto de ensayos de evaporación y propiedades del material. Mediante el uso del modelo matemático se calculó la tasa de evaporación. Posteriormente se diseñó un sistema de evaporación según la necesidad de aguas a tratar y de los datos extraídos en el laboratorio.

El concepto por el que nace este proyecto es *Wind-Aided Intensified Evaporation* (WAIV) es una tecnología de evaporación forzada por aire para aumentar la tasa de evaporación de agua. En relación con este diseño se ha realizado un estudio económico donde se comparan los costes derivados de la adición de estos sistemas (WAIV) al proceso y el beneficio que proporciona en cuanto al rendimiento de la tasa de evaporación.

Obtener resultados favorables representaría un gran avance en el tratamiento de estos residuos con un proceso completamente natural y de impacto positivo en el medioambiente, contribuyendo con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Palabras clave: *Wind-Aided Intensified Evaporation*, evaporador natural, tejido de bambú, sostenibilidad, diseño, estudio económico.

Resum

Les aigües salobres són un residu que han de ser tractades per la seua possible contaminació d'aigua dolça, sòls, ecosistemes i fauna circumdants. L'ús de l'evaporació natural assistida brinda l'oportunitat de tractar estos residus amb un menor consum energètic.

El present Treball de Fi de Grau se centra en el disseny i anàlisi d'un sistema d'evaporació natural utilitzant teixit de bambú com a mitjà d'evaporació. Es van emprar dades climatològiques de temperatura, humitat relativa i velocitat del vent que permeteren dissenyar el sistema d'evaporació per al tractament d'aigües salobres en condicions d'operació controlades.

L'objectiu de l'estudi va ser corroborar un model matemàtic que relacionarà els paràmetres climàtics amb la taxa d'evaporació d'aigua salobre a través d'un teixit de bambú. Per a això, es va realitzar un estudi de les condicions climàtiques de Cocentaina, amb esta informació es van dur a terme un conjunt d'assajos d'evaporació i propietats del material. Mitjançant l'ús del model matemàtic es va calcular la taxa d'evaporació. Posteriorment es va dissenyar un sistema d'evaporació segons la necessitat d'aigües a tractar i de les dades extretes en el laboratori.

El concepte pel qual naix este projecte és *Wind-Aided Intensified Evaporation* (WAIV) és una tecnologia d'evaporació forçada per aire per a augmentar la taxa d'evaporació d'aigua. En relació amb este disseny s'ha realitzat un estudi econòmic on es comparen els costos derivats de l'addició d'estos sistemes (WAIV) al procés i el benefici que proporciona quant al rendiment de la taxa d'evaporació.

Obtindre resultats favorables representaria un gran avanç en el tractament d'estos residus amb un procés completament natural i d'impacte positiu en el medi ambient, contribuint amb els objectius de desenvolupament sostenible (ODS).

Paraules clau: *Wind-Aided Intensified Evaporation*, evaporador natural, teixit de bambú, sostenibilitat, disseny, estudi econòmic.

Abstract

Brackish water is a waste that needs to be treated because of its potential contamination of surrounding freshwater, soils, ecosystems and wildlife. The use of assisted natural evaporation offers the opportunity to treat this waste with lower energy consumption.

This thesis focuses on the design and analysis of a natural evaporation system using bamboo fabric as the evaporation medium. Climatological data on temperature, relative humidity and wind speed were used to design the evaporation system for brackish water treatment under controlled operating conditions.

The objective of the study was to corroborate a mathematical model that will relate climatic parameters to the evaporation rate of brackish water through a bamboo fabric. To do this, a study of the climatic conditions of Cocentaina was carried out, and with this information a series of evaporation and material properties tests were carried out. Using a mathematical model, the evaporation rate was calculated. Subsequently, an evaporation system was designed according to the needs of the water to be treated and the data extracted in the laboratory.

The concept behind this project is Wind-Aided Intensified Evaporation (WAIV), a forced air evaporation technology to increase the evaporation rate of water. In relation to this design, an economic study has been carried out to compare the costs derived from the addition of these systems (WAIV) to the process and the benefit it provides in terms of the performance of the evaporation rate.

Obtaining favourable results would represent a breakthrough in the treatment of these wastes with a completely natural process and with a positive impact on the environment, contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Wind-Aided Intensified Evaporation, natural evaporator, bamboo fabric, sustainability, design, economic study.

Índice

1	Motivación	10
2	Objetivos	11
3	Introducción	12
3.1	Aguas residuales	12
3.1.1	Aguas con contaminantes orgánicos o de zonas urbanas	12
3.1.2	Aguas salobres.....	13
3.2	Tratamientos	13
3.2.1	Tratamientos biológicos	14
3.2.2	Tratamientos de membranas	15
3.2.3	Tratamientos de evaporación.....	17
3.2.4	Otros tratamientos	18
3.3	Técnicas	20
3.3.1	ZLD y MLD	20
3.3.2	WAIV.....	21
3.4	Tejidos.....	21
3.4.1	Tejidos sintéticos	22
3.4.2	Tejidos naturales	23
3.4.3	Proceso de extracción del bambú	23
4	Modelo matemático	25
4.1	Configuración del sistema	25
4.2	Presiones de vapor	25
4.2.1	Presión de vapor del aire	25
4.2.2	Presión de vapor de bulbo húmedo.....	26
4.3	Modelo y límites de funcionamiento	27
4.3.1	Modelo.....	27
4.3.2	Límite de funcionamiento.....	27
5	Materiales y metodología	28
5.1	Residuos de aguas salobres.....	28
5.1.1	Aguas sintéticas.....	28
5.1.2	Aguas salobres.....	29
5.2	Materiales y equipos	30
5.2.1	Caracterización y tratamiento previo de las aguas salobres	30
5.2.2	Determinación de presiones de vapor.....	31
5.2.3	Ensayos de evaporación	32
5.3	Técnicas	35

5.3.1	Caracterización de aguas	35
5.3.2	Absorción de líquido de los tejidos	35
5.4	Obtención de datos.....	35
5.5	Procedimiento	36
5.5.1	Aguas sintéticas	36
5.5.2	Aguas residuales.....	36
5.5.3	Datos climáticos	38
5.5.4	Preparación de tejidos.....	40
5.5.5	Determinación de presiones de vapor para las aguas salobres	40
5.5.6	Ensayo en cámara.....	40
5.5.7	Ensayo de evaporación natural	41
5.6	Ajuste de datos.....	42
5.6.1	Tratamiento de datos	42
5.6.2	Cálculo de tasas de evaporación.....	42
6	Resultados	43
6.1	Caracterización de las aguas salobres	43
6.1.1	Aguas salobres sintéticas.....	43
6.1.2	Aguas salobres de la empresa.....	43
6.1.3	Aguas salobres concentradas	43
6.2	Ensayos en cámara climática	44
6.2.1	Comparación ajustes.....	44
6.2.2	Comparación Velocidades	46
6.2.3	Comparación Temperaturas.....	47
6.2.4	Comparación Humedades.....	50
6.2.5	Comparación de aguas.....	51
6.3	Cálculo de constantes.....	53
6.3.1	Cálculo de pendientes.....	53
6.3.2	K_1	54
6.3.3	K_2	55
6.4	Validación del modelo	55
6.4.1	Nuevos ensayos	55
6.4.2	Ensayos de validación del modelo matemático.....	56
6.5	Ensayo de evaporación natural	56
7	Diseño del sistema de evaporación natural	60
7.1	Dimensionamiento del sistema de evaporación.....	60
7.1.1	Dimensionamiento del embalse.....	60
7.1.2	Dimensionamiento de los tejidos.....	61

7.2	Diseño del proceso de evaporación.....	61
8	Estudio económico	64
8.1	Costes de instalación.....	64
8.1.1	Material para el embalse.....	64
8.1.2	Material para los tejidos	64
8.1.3	Material para la estructura	65
8.1.4	Sistema Hidráulico	66
8.1.5	Tanque de homogenización	66
8.1.6	Costes de instalación totales	68
8.2	Estimación de costes anuales	69
8.3	Análisis de viabilidad.....	70
9	Conclusiones	72
10	Bibliografía	74
11	Anexos	77
11.1	Comunicaciones científicas	77
11.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.....	77
11.3	Planos.....	79
11.4	Diagrama de flujo	83

Índice de tablas

Tabla 1: Constantes del modelo matemático	27
Tabla 2: Datos obtenidos de Cocentaina 2016-2023.	39
Tabla 3: Condiciones a ensayar.	39
Tabla 4: Propiedades del agua salobre sintética.	43
Tabla 5: Caracterización de aguas salobres de la empresa.	43
Tabla 6: Caracterización de aguas salobres concentradas.	44
Tabla 7: Comparación tasas de evaporación de las aguas.	53
Tabla 8: Comparación tasas de evaporación de ensayos respecto las del modelo.	56
Tabla 9: Resultados ensayos de evaporación natural.	58
Tabla 10: Desglose de costes del embalse.	64
Tabla 11: Desglose de costes de los tejidos.	65
Tabla 12: Desglose de costes de los marcos.	65
Tabla 13: Desglose de costes de las vigas.	66
Tabla 14: Desglose de costes del sistema hidráulico.	66
Tabla 15: Desglose de costes del tanque de homogenización.	67
Tabla 16: Desglose de costes de las tuberías.	67
Tabla 17: Desglose de costes del grupo de presión de agua.	68
Tabla 18: Recopilación de los costes de instalación.	68
Tabla 19: Desglose de los costes anuales del proyecto.	70
Tabla 20: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	77

Índice de figuras

Figura 1: Filtrado por membranas [11].	15
Figura 2: Diagrama de procesado del bambú (Elaboración propia).	24
Figura 3: Reactivos	28
Figura 4: Aguas salobres filtrada.	29
Figura 5: Agua salobre concentrada.	29
Figura 6: PCE-PHD 1.	30
Figura 7: Test de DQO y vial.	31
Figura 8: Termorreactor y espectrofotómetro.	31
Figura 9: Equipos para la determinar presiones de vapor.	32
Figura 10: Cámara climática	32
Figura 11: Sistema diseñado para los ensayos en cámara climática.	33
Figura 12: Termohigrómetro	33
Figura 13: Pantalla de la balanza interna.	34
Figura 14: Balanzas.	34
Figura 15: Bidón de aguas salobres.	37
Figura 16: Filtrado de aguas salobres.	37
Figura 17: Proceso en evaporación en estufa.	38
Figura 18: Evolucion de la temperatura de Cocentaina en 2016.	38
Figura 19: Tejido de bambú.	40
Figura 20: Ensayo de evaporación natural.	42
Figura 21: Ajuste datos de Julio a 100 % de potencia del ventilador.	44
Figura 22: Ajuste de Julio a 50 % de potencia del ventilador.	45
Figura 23: Ajuste de Julio a 10 % de potencia del ventilador.	45
Figura 24: Comparación de velocidades del mes de Noviembre.	46
Figura 25: Comparación de las tasas de evaporación según las velocidades de viento por meses de aguas salobres.	47
Figura 26: Comparación de temperaturas entre Octubre y Marzo a 100 % de velocidad de viento.	48
Figura 27: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Octubre y Marzo.3	48
Figura 28: Comparación de temperaturas entre Septiembre y Noviembre a 100 % de velocidad de viento.	49
Figura 29: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Septiembre y Noviembre.	49
Figura 30: Comparación de humedades relativas entre Noviembre y Marzo a 50 % de velocidad de viento.	50
Figura 31: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Noviembre y Marzo.	51

Figura 32: Comparación de aguas mes de Septiembre 100 % de velocidad de viento.	52
Figura 33: Cálculo de pendientes.	54
Figura 34: Pendientes respecto a velocidades del viento.	54
Figura 35: Ordenada en el origen respecto a velocidad del viento.....	55
Figura 36: Resultados del ensayo de evaporación en los vasos grandes.	57
Figura 37: Resultados del ensayo de evaporación en los vasos pequeños.	57
Figura 38: Residuo de salmuera en los vasos de los ensayos de evaporación natural.	58
Figura 39: Cristales presentes en el residuo de salmuera.	59
Figura 40: Evolución de la masa evaporada según la superficie del embalse.....	60
Figura 41: Evolución de la superficie necesaria respecto al caudal.	61
Figura 42: Diagrama de flujo del proceso de evaporación.....	83

1 Motivación

Cada día la población aumenta y agregado a ello crecen las demandas, bienes y servicios de ésta. Por esta razón cada vez más empresas intentan abarcar estas demandas, ofertando productos que las satisfagan. Como resultado tenemos un aumento en el consumo de materias primas por parte de estas empresas, dando lugar a una escasez en estas materias primas. El agua destaca como uno de los bienes más demandados

La falta de agua sufre una alta demanda, pese a que esta está en abundancia en nuestro planeta, la mayoría no es dulce. Ante esta problemática surgen diferentes estrategias para la obtención de agua dulce. Por un lado, reducir el consumo de agua es una estrategia completamente necesaria para cuidar el consumo de agua, para ello se unas herramientas como los sistemas de riego por goteo en la agricultura y el uso de dispositivos de bajo consumo en hogares e industrias. Por otro lado, gestionar los residuos es esencial para poder recuperar la máxima cantidad de agua. Para ello se desarrollan un conjunto de tecnologías capaces de adaptarse según las exigencias de cada industria algunos ejemplos son tratamientos biológicos, de membrana o de evaporación.

Últimamente está ganando fuerza el concepto de evaporación natural, que se basa en un bajo coste y mantenimiento, ya que la energía impulsora de este tratamiento son las condiciones climáticas de la zona. No se obtiene un caudal de agua limpia, ya que estos sistemas liberan el agua a la atmósfera. Aunque esto pueda parecer un gran inconveniente, el agua evaporada se reaprovecha mediante el ciclo del agua, lo que puede ser beneficioso a largo plazo. Además, se ahorran los costes derivados de un proceso de recuperación de agua.

Ahora bien, por todo lo mencionado anteriormente es que surge la motivación para realizar este trabajo de fin de grado, donde se pretende diseñar un sistema de evaporación natural asistido por aire para mejorar el tratamiento de aguas salobre. Lográndose una gran concentración de las sales, disminuyendo así el caudal de agua salobre, puesto que el agua es un bien escaso y estas industrias pueden potenciar al máximo la correcta y sostenible gestión de este bien.

2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo final de grado es diseñar un sistema de evaporación natural asistida por aire para el tratamiento de aguas salobres. Además de poder concentrar los residuos salobres en gran medida, facilitando su posterior procesado.

También hay subobjetivos que sin de igual importancia para el desarrollo del trabajo, como subobjetivos se plantean:

- Caracterizar y estudiar todas las aguas con las que se realizaran ensayos, conociendo su pH, conductividad y DQO.
- Determinar cuáles serán las condiciones climáticas idóneas para que una industria pueda operar mediante el sistema de evaporación natural que se pretende diseñar.
- Determinar tasas de evaporación en los ensayos a realizar, entendiendo como afecta la velocidad del aire, la humedad relativa, la temperatura y la salinidad.
- Diseñar un modelo matemático que explique la tasa de evaporación debida a una corriente de aire y a la diferencia de presiones de vapor, sin tener en cuenta la radiación solar.
- Determinar las presiones de vapor de las aguas salobres de manera experimental, para el desarrollo del modelo matemático.
- Realizar un estudio económico, que abarque todos los aspectos del sistema de evaporación natural anteriormente diseñado.
- Cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), aportando al avance de la industria por un mundo mejor cuidado y más sostenible.

3 Introducción

El agua es un recurso vital para la existencia misma de la vida en nuestro planeta, ha sido desde tiempos inmemoriales un símbolo de pureza, renovación y abundancia. Sin embargo, su importancia en los últimos años se centra en su labor fundamental para la sostenibilidad de ecosistemas y el desarrollo humano. A pesar de su aparente abundancia, enfrentamos desafíos significativos en relación con su disponibilidad y calidad. La contaminación, la sobreexplotación de acuíferos, la ganadería intensiva, el cambio climático y la creciente población son solo algunas de las problemáticas que amenazan la seguridad hídrica a nivel global. En este contexto, las empresas tienen un papel crucial en la adopción de prácticas sostenibles y tecnologías limpias que minimicen su impacto en los recursos hídricos y reduzcan sus emisiones contaminantes, contribuyendo así a una mejor gestión del agua [1].

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) son un conjunto de ideas que pretenden “transformar nuestro mundo”, estas tienen como pilar fundamental crear un mundo mejor, tratan de mejorar y transformar las metodologías aplicadas. Se dividen en tres grandes disciplinas la económica, la social y la ambiental, para ello proponen nuevas metas a cumplir en pos de mejorar la sostenibilidad y no dejando a nadie atrás. Se aceptan a todos los países dispuestos a colaborar y contribuir a estas causas propuestas en la Agenda 2030 [2].

La huella de carbono es un término ampliamente conocido, pero que no posee una clara definición o no siempre se usa acorde a la definición dada. Este concepto no está claramente definido ni respaldado por la comunidad científica, pero es frecuentemente usada por medios y empresas. En la comunidad científica se han desarrollado una gran variedad de conceptos similares dependiendo del ámbito, algunos ejemplos se muestran a continuación:

- Contabilidad de gases de efecto invernadero
- Cálculo de gases de efecto invernadero
- Contabilidad de carbono
- Calculadora de carbono

En el ámbito empresarial se suele usar la acepción de huella de carbono refiriéndose a la “Huella Ecológica” como concepto. Esto se hace para mostrar el compromiso de la empresa con el medioambiente, ya que aún no existen metodologías ni regulaciones para contabilizar y declarar estas emisiones a través del concepto de huella de carbono [3, 4].

Teniendo en cuenta estas diversas terminologías se usará el concepto huella de carbono para referirse a la emisión de gases de efecto invernadero derivados del proceso, tratamiento, técnica o maquinaria del que se haga uso o referencia.

3.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellos efluentes líquidos resultantes de actividades humanas que, tras su uso, presentan modificaciones en su composición química y biológica. Estas aguas provienen de diversas fuentes como hogares, industrias, comercios, y zonas agrícolas, entre otras, y su tratamiento es crucial para evitar impactos adversos en la salud pública y en el medio ambiente [5].

3.1.1 Aguas con contaminantes orgánicos o de zonas urbanas

Las aguas residuales urbanas son aquellas generadas en áreas urbanas por actividades domésticas, comerciales e industriales. Estas aguas contienen una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos que requieren tratamiento antes de su descarga o reutilización.

Los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales urbanas incluyen materia orgánica derivada de alimentos, detergentes y productos de limpieza. Esta materia orgánica puede consumir oxígeno en el agua si no se trata adecuadamente, lo que afecta negativamente la vida acuática. Además de la materia orgánica, las aguas residuales urbanas pueden contener compuestos orgánicos sintéticos, como productos químicos industriales, pesticidas y fármacos. Estos compuestos son a menudo persistentes y difíciles de degradar, representando riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente si no se eliminan durante el tratamiento. Otro grupo de contaminantes comunes en las aguas residuales urbanas son los patógenos, que incluyen bacterias, virus y otros microorganismos. Estos patógenos pueden propagar enfermedades.

El tratamiento de las aguas residuales urbanas implica una serie de procesos físicos, químicos y biológicos como la coagulación, la sedimentación, la filtración y la desinfección. Estos procesos se centran en remover eficazmente los contaminantes presentes en las aguas residuales y garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad establecidos antes de su disposición final o reutilización [6].

3.1.2 Aguas salobres

Las aguas residuales salobres son efluentes que contienen altas concentraciones de sales disueltas y otros minerales, haciéndolas inadecuadas para usos convencionales sin tratamiento previo.

Estas aguas pueden provenir de diversas fuentes, como procesos industriales de desalinización, descargas industriales con altos contenidos de sales y metales pesados, y áreas agrícolas donde se utilizan aguas con altas concentraciones de sales para riego.

En hidrogeología se define comúnmente al agua salobre como agua superficial o subterránea con sólidos disueltos totales (TDS) en el rango de 1–25 g/L. El TDS del agua salobre es mayor que el del agua dulce ($TDS < 1$ g/L) y menor que el del agua de mar ($TDS \sim 35$ g/L). El agua salobre subterránea es relativamente abundante, ocupando más de la mitad del almacenamiento total de agua subterránea. Generalmente, con un TDS de 1–5 g/L se define como agua salobre de baja salinidad, mientras que con un TDS de 5–10 g/L se define como agua salobre de salinidad media, y el agua salobre con un TDS superior a 10 g/L se define de alta salinidad [7].

En algunos casos, el agua salobre puede usarse directamente o después de diluirse con agua dulce para hidrofracturación (o en inglés *fracking*), plantas de energía y riego de cultivos que toleren la sal. Sin embargo, la existencia de minerales con concentraciones por encima de sus solubilidades aumenta la precipitación de sal y los problemas de cristales que se pueden incrustar. Para hacer frente a estas problemáticas se imponen políticas más restrictivas en cuanto a la calidad del agua y las emisiones contaminantes. Normativas y regulaciones establecen límites estrictos para la descarga de efluentes y la gestión de aguas residuales, incentivando prácticas más sostenibles y tecnologías más eficientes en el tratamiento y la reutilización del agua [8, 9].

3.2 Tratamientos

Tratar las aguas salobres para convertirlas en potables o aptas para diversos usos industriales, de la población o agrícolas es un desafío fundamental en la gestión de los recursos hídricos. Existen múltiples tratamientos para este propósito, cada uno con sus características, ventajas y desventajas.

Es importante destacar que los tratamientos de aguas salobres se centran en generar dos caudales, uno con agua con una baja cantidad de sales y otro donde las concentren. Si bien esta es la idea principal, cada tratamiento es capaz de concentrar hasta cierto punto las sales, por lo que las industrias tienden a combinar los diversos tratamientos para lograr un mejor resultado en la separación entre agua y sales.

Ahora bien, los tratamientos más frecuentes en la industria son los biológicos, de membranas y de evaporación. Existen otros muchos, pero se encuentran en desarrollo o presentan grandes problemas en eficiencia y costes. A continuación, se hace una descripción de los procesos, ventajas y desventajas.

3.2.1 Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos ofrecen una opción prometedora para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales, destacándose por su eficiencia y bajo consumo de energía. Sin embargo, su aplicación efectiva depende de superar los desafíos relacionados con la adaptación microbiológica y la gestión operativa, para garantizar un rendimiento estable y sostenible incluso en condiciones de alta salinidad.

Existen diversos tratamientos biológicos, entre ellos destacan los anaeróbicos, aeróbicos y los de lodos activados. A continuación, se verá una descripción del proceso con sus principales ventajas y desventajas [10].

3.2.1.1 *Tratamientos biológicos anaeróbicos*

El tratamiento biológico anaeróbico se ha destacado como una estrategia eficaz para el tratamiento de aguas residuales salobres (o por sus siglas en inglés SOW), utilizando microorganismos en ausencia de oxígeno para descomponer materia orgánica en aguas residuales. En contextos de alta salinidad, los microorganismos anaeróbicos son adaptados gradualmente a condiciones salinas incrementando la salinidad del agua residual. Este proceso involucra principalmente reactores como los *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), reactores de lecho fluidizado y técnicas avanzadas como la adición de bacterias halotolerantes o materiales conductores como la magnetita para mejorar el rendimiento del tratamiento.

Entre las principales ventajas de esta tecnología se encuentran su capacidad para tratar aguas residuales con altas cargas orgánicas y la producción de biogás, que puede ser aprovechado como fuente de energía. Además, esta tecnología permite la reducción de sólidos suspendidos y materia orgánica. Sin embargo, presenta desventajas significativas, como un largo período de adaptación para los microorganismos y la inestabilidad de los sistemas debido a la sensibilidad a cambios en la salinidad. También tiene una menor tolerancia a la salinidad en comparación con tecnologías aeróbicas y, a menudo, requiere sinergias con otros métodos o adaptaciones especiales para aumentar su eficiencia.

3.2.1.2 *Tratamientos biológicos aeróbicos*

Los tratamientos biológicos aeróbicos se utilizan a menudo como un tratamiento secundario tras los procesos anaeróbicos para tratar aguas residuales salinas (SOW). Este enfoque emplea microorganismos aeróbicos que requieren oxígeno para descomponer los contaminantes orgánicos en las aguas residuales. El proceso generalmente utiliza sistemas de lodos activados, biorreactores de membrana (MBR) y reactores secuenciales por lotes (SBR). En general, estos sistemas pueden ser más efectivos cuando se combinan con tratamientos anaeróbicos previos.

Este tratamiento biológico presenta varias ventajas, como una mayor tolerancia a la salinidad en comparación con los métodos anaeróbicos y un menor período de adaptación para los microorganismos. Además, puede lograr una alta eficiencia en la remoción de DQO y otros contaminantes orgánicos en condiciones controladas. Sin embargo, también tiene desventajas, como una menor capacidad de carga orgánica en comparación con los sistemas anaeróbicos y una sensibilidad a aumentos repentinos en la salinidad, lo que puede disminuir la eficiencia del tratamiento. Además, requiere un suministro constante de oxígeno, lo que puede incrementar los costos operativos.

3.2.1.3 Tratamiento biológico con lodo activado aclimatado

El tratamiento biológico de aguas residuales de alta salinidad mediante lodo activado aclimatado implica la adaptación gradual del lodo activado común al aumento progresivo de la salinidad en el agua residual. Este proceso se basa en incrementar lentamente los niveles de salinidad para permitir que los microorganismos presentes en el lodo activado desarrollen tolerancia a las condiciones salinas. El objetivo es aclimatar los microorganismos para que puedan degradar eficientemente los contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales con alta concentración de sal.

Una de las principales ventajas de este método es que permite utilizar microorganismos ya presentes en el lodo activado, evitando la necesidad de introducir nuevas cepas de bacterias. Además, este enfoque también facilita la integración con sistemas de tratamiento de aguas salobres ya existentes, lo que puede ser beneficioso en términos de costos y tiempo de implementación. Sin embargo, este proceso presenta varias desventajas significativas. Uno de los principales inconvenientes es el tiempo prolongado requerido para la aclimatación de los microorganismos, lo cual puede extender el periodo de tratamiento y aumentar los costos operativos. Además, la alta salinidad puede ejercer un efecto inhibitorio sobre los microorganismos, reduciendo su actividad metabólica y, en consecuencia, la eficiencia del tratamiento. También se ha observado que los sistemas biológicos aclimatados a alta salinidad pueden ser inestables y sensibles a fluctuaciones en las condiciones del agua residual, lo que puede comprometer la consistencia del tratamiento.

3.2.2 Tratamientos de membranas

Existen ciertos tratamientos para aguas salobres con una mayor importancia cada uno por diversos motivos, entre ellos destacan ciertos procesos basados en membranas. En la Figura 1 se observa un esquema que facilita la comprensión de un sistema de filtración.

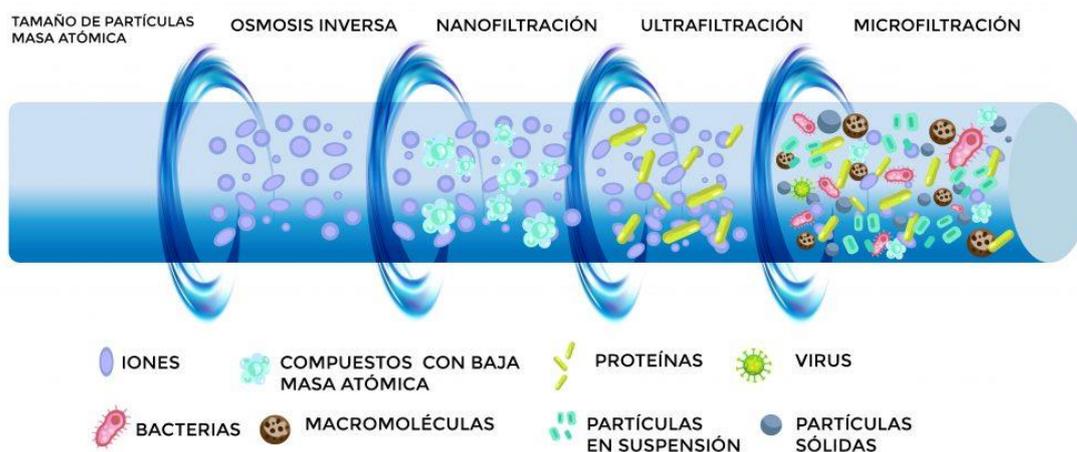


Figura 1: Filtrado por membranas [11].

La filtración se basa en una corriente de agua salobre que atraviesa una membrana, esta membrana retiene las sales disueltas y todas las partículas de mayor tamaño que sus poros. Como se observa

en la Figura 1 según el tamaño de poro se dividen en diferentes tipos de tratamientos microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración, siendo este último uno de los más relevantes. Estos procesos se suelen combinar con las ósmosis directa e indirecta principalmente para lograr mejores tasas de desalación.

Comúnmente en la industria se les da uso a estos procesos de filtrado de aguas salobres, primero se realiza un pretratamiento para eliminar sólidos grandes y microorganismos con membranas de microfiltración y de ultrafiltración. Luego, se utilizan de nanofiltración y/o un proceso de ósmosis inversa para la desalación, seguido de un tratamiento de la salmuera residual. Aunque la nanofiltración y la ósmosis inversa se puede cambiar por otros tratamientos [12, 13].

3.2.2.1 La microfiltración (MF)

La microfiltración es un proceso de separación física que opera a presión de 0,5 a 2 bar que utiliza membranas porosas con poros de tamaño micrométrico, típicamente entre 0,1 y 10 μm , para filtrar partículas sólidas y microorganismos de una solución líquida. Este método se basa en la capacidad de las membranas para retener materiales suspendidos mientras permiten el paso del solvente.

3.2.2.2 La ultrafiltración (UF)

La ultrafiltración opera a presiones mayores de 0,5 a 5 bar y es efectiva para eliminar partículas, microorganismos y macromoléculas, pero no es adecuada para eliminar sales disueltas debido a su tamaño de poro más grande entre 10 y 100 nm. Esta técnica se usa como pretratamiento para evitar que las partículas de mayor tamaño lleguen al resto de procesos pudiendo taponar las membranas. La ultrafiltración tiene menores costos operativos y es menos propensa al ensuciamiento (o en inglés *fouling*), pero no elimina las sales disueltas, estas pasan por sus poros.

3.2.2.3 La nanofiltración (NF)

La nanofiltración emplea membranas porosas bajo un gradiente de presión de 5 a 20 bar, filtrando solutos con pesos moleculares entre 200 y 1000 Da. Es eficaz para eliminar iones multivalentes y compuestos orgánicos grandes, pero no elimina completamente los iones monovalentes. La nanofiltración es más selectiva y tiene un mayor flujo de agua, pero es propensa a la formación de incrustaciones y ensuciamiento de la membrana. Su diámetro de poro es de 1 y 10 nm [5, 14].

3.2.2.4 La ósmosis inversa (OI)

La ósmosis inversa es un proceso en el que se obliga a las aguas salobres mediante presión hidráulica a pasar a través de una membrana semipermeable, logrando así que la sal no pueda atravesar la membrana y se genere un caudal de agua con una muy baja concentración de sales. Este proceso se ha utilizado ampliamente en plantas desalinizadoras para producir agua potable y de riego. La ósmosis inversa requiere menos energía que otros métodos de desalación, como la destilación, pero aún posee una demanda de energía alta dependiendo de las condiciones de operación. La calidad del agua producida por la ósmosis inversa es alta, pero se debe prestar atención al mantenimiento de las membranas para evitar la acumulación de incrustaciones y la degradación. La ósmosis inversa es un método efectivo y ampliamente utilizado para tratar aguas salobres, pero es imprescindible mejorar su eficiencia energética y reducir los costos operativos derivados de la necesidad de renovar las membranas constantemente.

3.2.2.5 La ósmosis directa (OD)

La ósmosis directa es un proceso comercial práctico desde la década de 1930 que se utiliza para desalar el agua. En la ósmosis directa se utiliza una solución concentrada de arrastre para generar alta presión osmótica, lo que logra que el agua pase a través de una membrana semipermeable desde la solución de alimentación. Esta solución de arrastre se regenera y se puede reutilizar, lo que hace que el proceso sea más sostenible. La ósmosis directa ofrece la ventaja de ser combinable con procesos de energía térmica y de membranas. Sin embargo, se necesitan soluciones de arrastre

no tóxicas y económicas, y la separación de estos agentes sigue teniendo un gasto energético elevado [15].

3.2.3 Tratamientos de evaporación

Los tratamientos mediante evaporación son los más adecuados para la concentración de aguas salobres, ya que su aplicación permite obtener un residuo concentrado más fácil de gestionar que el residuo original y un flujo líquido descontaminado que puede ser directamente vertido, reutilizado o incluso sin recuperación, siendo así un proceso con una huella de carbono mínima.

3.2.3.1 *Evaporación solar*

Los destiladores solares tradicionales tienen una eficiencia energética limitada debido a la gran cantidad de calor necesario para evaporar el agua en grandes cantidades. Para mejorar la eficiencia, se han desarrollado tecnologías como la evaporación solar interfacial (SIE), que transfiere la energía solar-térmica a la interfase agua-aire. Este proceso confina efectivamente el calor en la superficie de la capa de evaporación, minimizando la pérdida de calor y mejorando significativamente la eficiencia de la evaporación del agua. Los evaporadores solares están diseñados con características como excelente capacidad de absorción de luz, baja pérdida de calor y capacidad efectiva de transporte de agua, lo que les permite producir vapor limpio en la interfase agua-aire y mejorar el rendimiento general de la evaporación.

En el tratamiento de aguas residuales, la evaporación solar ha ganado atención por su capacidad para eliminar contaminantes y abastecer a la población. La presencia de sales en las aguas residuales requiere la fabricación de nuevos materiales con alta absorción de radiación solar. Los materiales semiconductores y basados en carbono, como el dióxido de titanio (TiO_2) y el grafeno, se han examinado ampliamente por su superior absorción de luz y eficiencia en la remediación de aguas residuales.

Sin embargo, también presenta desventajas. Los costos iniciales de instalación de sistemas de evaporación solar pueden ser elevados, aunque los costos operativos a largo plazo sean bajos. La eficiencia de la evaporación solar depende de la disponibilidad de luz solar, lo que puede limitar su efectividad en regiones con baja irradiación solar. Además, el desarrollo y producción de materiales fototérmicos avanzados pueden ser costosos y requerir tecnología especializada [16-18].

3.2.3.2 *Evaporación natural*

La evaporación natural es un proceso por el cual el agua se evapora de superficies abiertas debido a la energía solar y otros factores ambientales, como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire. En los tratamientos por evaporación se pretende fomentar estos aspectos al máximo, potenciando todos los motivos por los que se produce la evaporación. La evaporación natural es un proceso continuo donde en búsqueda de aumentar la tasa de evaporación se desarrollan diversos sistemas para fomentar el impacto de alguno de los factores que dan lugar a la evaporación natural, diversos ejemplos serían:

- Lograr mejores distribuciones de las aguas a tratar, generando estructuras donde el agua pueda fluir de manera laminar esto permite una mayor área de contacto del agua, otra opción es usar materiales porosos o absorbentes capaces de contener agua para lograr una mayor exposición a los factores ambientales.
- Buscar zonas geográficas con buenas condiciones para la evaporación natural, esto aumenta la eficiencia del proceso. Según la época del año puede no ser buena idea el uso de este tratamiento.
- La adición de corrientes de aire puede marcar una diferencia significativa, puesto que el agua al evaporarse se transfiere al aire en forma de vapor de agua, esta transferencia de

materia va ligada a la presión de vapor, esto quiere decir que el aire es capaz de contener una cantidad máxima de agua y mientras más cerca esté de esta cantidad máxima de agua menor es la transferencia de agua al aire, la corriente de aire renueva el aire logrando que se aumente la tasa de evaporación al constantemente tener aire nuevo que tiene la máxima transferencia.

Todas estas estrategias nacen de la comprensión de la naturaleza del agua y nos permiten una mejor gestión de este recurso. Cabe destacar que el agua es evaporada al medioambiente, favoreciendo el ciclo del agua. Existe una nueva corriente de trabajo que se basa en todas las estrategias anteriormente mencionadas esta se conoce como evaporación intensificada asistida por viento (WAIV) [19, 20].

3.2.4 Otros tratamientos

Los tratamientos que se describen a continuación son más novedosos, lo que quiere decir que se están estudiando o bien presentan un menor uso en el tratamiento de aguas salobres, debido a problemas diversos, entre ellos suelen destacar elevados costes energéticos y elevados costes de instalación [12, 15, 21, 22].

3.2.4.1 *Destilación por membrana (DM)*

La destilación por membrana es un proceso impulsado térmicamente que combina tecnología de membranas y procesamiento por evaporación en una sola unidad. El vapor de agua atraviesa membranas hidrófilas gracias a la diferencia de temperatura a través de la membrana, lo que permite la transferencia de vapor a través de la membrana hacia una superficie de condensación. Este proceso no se ve limitado a unas concentraciones de sal bajas o altas, sino a la temperatura del flujo de alimentación. La destilación por membrana ofrece la ventaja de operar a presión atmosférica y bajas temperaturas, pero su bajo flujo de agua y su eficiencia energética limitada plantean desafíos. Se necesitan mejoras en los materiales de membrana y en el diseño de módulos para aumentar la viabilidad comercial de la destilación por membrana.

3.2.4.2 *Humidificación-deshumidificación (HDH)*

El proceso de humidificación-deshumidificación es una forma de destilación basada en la capacidad aumentada del aire para transportar vapor de agua a temperaturas más altas. En este proceso, un flujo de aire caliente se pone en contacto con el agua de alimentación que necesita ser tratada. El aire extrae una cierta cantidad de vapor en la zona de humidificación, y luego, en la zona de deshumidificación, se recupera agua destilada al hacer que el aire húmedo entre en contacto con una superficie de enfriamiento, lo que provoca la condensación de parte del vapor mezclado con el aire. Este sistema incluye un humidificador, un deshumidificador y un calentador para calentar el gas portador o el flujo de agua de alimentación. Este alto consumo de energía asociado con todos los componentes que posee es una clara desventaja, se sigue estudiando la forma que este proceso pueda competir con el resto.

3.2.4.3 *Desalación por adsorción*

La desalación por adsorción es una tecnología térmica que utiliza fuentes de calor residual de baja temperatura o energía solar para impulsar el ciclo de adsorción utilizando un gel de sílice altamente poroso. En este método, la vaporización del agua ocurre en un evaporador, seguido de la adsorción/desorción del vapor en el gel de sílice y la condensación en el condensador. Los ciclos de desalación por adsorción se operan en lotes en uno o más pares de reactores. En un reactor (un ciclo), el adsorbente de gel de sílice se utiliza para adsorber el vapor generado en el evaporador. El gel de sílice saturado en otro lecho (en el siguiente ciclo) se regenera mediante una fuente de calor a baja temperatura (típicamente 50-85 °C) o energía solar. El vapor desorbido se condensa luego en las superficies de los tubos de un condensador. Este método emergente de desalación produce agua potable de alta calidad y energía de refrigeración con solo una fuente de

calor de entrada. El gel de sílice tiene una alta captación de vapor de agua y regeneración por una fuente de calor residual de baja temperatura que de otra manera sería purgada a la atmósfera sin utilizar. Es un proceso nuevo que presenta grandes mejoras en la desalación de agua de mar respecto de las tecnologías convencionales basadas en energías térmicas y de membrana. Pero es proceso costoso y complejo de desarrollar teniendo en cuenta la necesidad de un gran espacio y número de reactores para los ciclos presentes. Además de que el gel de sílice puede ser un residuo si no se logra regenerar como es debido.

3.2.4.4 *Electrodiálisis (ED)*

La electrodiálisis es una tecnología de desalación que mediante un trabajo eléctrico y con el uso membranas de intercambio iónico puede separar la sal de una solución diluida, llevándola a una solución concentrada. En esencia, la electrodiálisis funciona aplicando una corriente eléctrica que moviliza los iones de sales a través de las membranas, separando así el agua de la sal. Esta tecnología ha sido utilizada con éxito para la desalación de agua salobre y la concentración de agua de mar o salmuera de ósmosis inversa para la producción de sal.

Una de las principales ventajas de la electrodiálisis es su capacidad para tratar eficientemente aguas con diversas concentraciones de sal. Además, en comparación con otras tecnologías de desalación, la electrodiálisis generalmente consume menos energía, especialmente cuando se trata de aguas con salinidad baja a moderada. Otra ventaja significativa es la menor huella de carbono, lo cual la hace una opción más amigable con el medio ambiente. No obstante, la electrodiálisis también presenta desventajas. Una de las principales limitaciones es que, a altas concentraciones de sal, su eficiencia disminuye y el costo operativo aumenta. Además, la electrodiálisis requiere una prefiltración rigurosa del agua para evitar el ensuciamiento y bloqueo de las membranas, lo cual puede incrementar los costos iniciales y de mantenimiento. Otra desventaja es que, aunque es efectiva para la desalación de agua salobre, no es tan eficiente como la ósmosis inversa para el tratamiento de agua de mar altamente salina.

3.2.4.5 *Pervaporación*

La desalación de aguas salobres mediante pervaporación separa moléculas de agua libres de las esferas de hidratación iones de sales más voluminosos. Este proceso combina la permeación de membrana y la evaporación, lo que lo hace particularmente efectivo para la desalación, logrando un rechazo de sal cercano al 100 % o retenciones de iones superiores a la ósmosis inversa, todo esto con un consumo energético potencialmente bajo. Sin embargo, la principal desventaja de la pervaporación es el bajo flujo de agua, especialmente a bajas temperaturas. A temperaturas elevadas (50-60 °C), el flujo y la difusividad del agua disminuyen con el aumento de la concentración de sal debido a la reducción de la presión de vapor del agua. La temperatura del agua de alimentación, la presencia de vacío, el grosor de la membrana y la permeabilidad del polímero son factores críticos que determinan el rendimiento del proceso.

3.2.4.6 *La destilación flash.*

La desalación por destilación flash multietapa o por sus siglas en Inglés *Multi Stage Flash* (MSF) es un proceso ampliamente utilizado para tratar aguas salobres y convertirlas en agua dulce. En una planta MSF, el agua salobre se calienta y luego se introduce en una serie de cámaras de baja presión. Cada cámara tiene una presión y temperatura más baja que la anterior, lo que provoca que el agua hierva instantáneamente o "flashee" en vapor. Este vapor se condensa en las superficies frías de los tubos que llevan agua de mar para enfriamiento, produciendo agua destilada. El proceso se repite a lo largo de múltiples etapas, aumentando la eficiencia de la operación. Las plantas de destilación flash multietapa típicamente constan de dos secciones principales: recuperación de calor y rechazo de calor. En la sección de recuperación de calor, el vapor producido en cada etapa condensa, transfiriendo calor al agua de alimentación, lo que

precalienta esta agua antes de entrar a la primera etapa de destilación. En la sección de rechazo de calor, el calor residual se elimina del sistema.

La destilación flash multietapa presenta varias ventajas y desventajas. Entre las ventajas se incluye su capacidad para manejar grandes volúmenes de agua salobre. Además, el proceso puede operar de manera continua, lo que garantiza un suministro constante de agua. Las plantas MSF también pueden utilizar el calor residual de otras operaciones industriales, mejorando la eficiencia energética. Sin embargo, el proceso también tiene desventajas significativas. Presenta una alta exigencia energética, lo que lo hace costoso de operar. También se vuelve especialmente contaminante cuando se utiliza energía de combustibles fósiles. Además, la infraestructura inicial para las plantas MSF es cara, y su mantenimiento puede ser complejo debido a la corrosión y el desgaste de los componentes por la alta salinidad y temperaturas. Finalmente, estas plantas pueden tener un impacto ambiental considerable, incluyendo la producción de salmuera concentrada que debe ser gestionada adecuadamente para evitar daños a los ecosistemas marinos.

3.3 Técnicas

Las técnicas son las diferentes metodologías que se aplican en los equipos o sistemas para cada tratamiento en particular tratando de obtener la versión óptima que aporta los mejores resultados.

Para obtener agua potable se usa ósmosis inversa generando un rechazo de agua con altas concentraciones de salmuera aquí es donde juega un papel fundamental la evaporación, logrando evaporar el agua restante y generando un residuo de salmuera que posteriormente se puede tratar. Se puede imitar esta idea para las aguas salobres que se generan como rechazo de las industrias textiles. Pues de aquí es de donde surgen ciertos conceptos como descarga cero de líquido (o en inglés *Zero Liquid Discharge ZLD*) y descarga mínima de líquido (o en inglés *Minimal Liquid Discharge MLD*), estos hacen referencia a la cantidad de agua restante en la sal después del tratamiento.

3.3.1 ZLD y MLD

Los sistemas ZLD incorporan numerosas tecnologías de desalación para producir agua dulce y eliminar completamente los desechos líquidos. El agua dulce generada por los sistemas ZLD es de alta pureza y puede ser utilizada para uso doméstico o industrial. Además del agua dulce, la salmuera que se produce puede ser vendida, utilizada por la industria misma o desechada de manera ambientalmente amigable.

Si bien para algunas industrias la estrategia ZLD es una solución sostenible, no es la opción más razonable para todas debido a los altos costos. Con este fin, cuando se satisfacen las necesidades y requisitos regulatorios y ambientales, la estrategia MLD parece ser una opción prometedora y más rentable para las industrias. La estrategia MLD es similar a la estrategia ZLD porque utiliza tecnologías comunes, pero las tecnologías se han combinado para recuperar hasta el 95 % de agua dulce.

Una característica clave de los sistemas MLD y ZLD es el número de etapas que los componen. Un sistema ZLD convencional se compone de cuatro etapas. Las etapas son tratamiento anteriormente mencionado, preconcentración, evaporación y cristalización. Los sistemas MLD constan de 2 etapas, pretratamiento y preconcentración, en lugar de 4 etapas, ya que el objetivo de recuperación de agua dulce se establece entorno al 95 %.

Además, es importante enfatizar que hay una amplia variedad de combinaciones y disposiciones tecnológicas en los sistemas MLD/ZLD, y que no es factible tener un sistema MLD o ZLD estandarizado. Por lo tanto, los sistemas MLD/ZLD pueden incorporar más de dos tecnologías.

Las filosofías de trabajo de MLD y ZLD que busca la separación parcial o completa de agua de la sal, teniendo como objetivo obtener un efluente de agua dulce. Es aquí donde surge una nueva técnica que pierde de vista este objetivo, centrándose en la separación de sal y agua sin recuperar este valioso recurso, ya que lo evapora. Esta técnica se conoce como evaporación intensificada asistida por viento (WAIV) [23].

3.3.2 WAIV

La Evaporación Intensificada Asistida por Viento (WAIV) ha emergido como una solución innovadora para abordar los desafíos asociados con la gestión de salmuera en la industria de desalación. Con el crecimiento de la desalación para satisfacer la demanda de agua dulce en diversas aplicaciones municipales, turísticas, agrícolas e industriales, surge la necesidad de encontrar métodos eficientes y sostenibles para el tratamiento de los concentrados de desalación.

La técnica WAIV se basa en la utilización del poder del viento para acelerar el proceso de evaporación de la salmuera, reduciendo así el volumen de desechos concentrados y facilitando su manejo. Esta tecnología es empleada por la industria de la siguiente manera, se instalan unas superficies verticales dispuestas con ángulo donde se recirculan las salmueras, se disponen según la dirección predominante del viento. Al maximizar la exposición de la salmuera al aire en movimiento, la técnica WAIV promueve una mayor tasa de evaporación, lo que resulta en una reducción efectiva del volumen de residuos concentrados.

La presencia de la técnica WAIV en la industria de desalación está en aumento, ya que ofrece una serie de ventajas significativas. En primer lugar, permite una gestión más eficiente de los concentrados de desalación al reducir su volumen y minimizar la necesidad de su eliminación en vertederos o suelos. Esto ayuda a mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la descarga de salmuera altamente concentrada en cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Además, ofrece una solución rentable para la gestión de salmuera en áreas donde la disponibilidad de tierras para la construcción de estanques de evaporación es limitada o costosa. Al utilizar el espacio de mejor manera gracias a una mayor tasa de evaporación en un mismo espacio y aprovechar el poder natural del viento, esta tecnología reduce la superficie requerida, lo que la hace especialmente atractiva en entornos urbanos o con restricciones de espacio.

En este proyecto se pretende añadir a esta técnica el uso de tejidos para un mejor aprovechamiento del espacio. La diferencia es que no se usarán superficies inclinadas por donde pasara el fluido, sino que se sumergirán tejidos y se expondrán al efecto del sol y del viento de manera vertical. Además, sabiendo las tasas de evaporación y las condiciones ambientales se diseñarán los tiempos que los tejidos han de estar evaporándose, para volver a sumergirlos [24].

3.4 Tejidos

En este trabajo de fin de grado toma uso de las técnicas de evaporación intensificada asistida por aire requiere del uso de materiales absorbentes, para ello destacan dos categorías de materiales, los sintéticos y los naturales.

La idea de usar tejidos, ya sean sintéticos o naturales, lo que se busca con estos materiales es lograr un aumento de la superficie en contacto del fluido con el ambiente, pudiendo lograr así una mayor tasa de evaporación. Ahora bien, es importante hacer una correcta selección del material a usar, porque incluso dentro de los materiales anteriormente mencionados existe una infinidad de opciones, donde son importantes características como resistencia, absorción de líquido, la estructura del tejido, su dureza y la reciclabilidad entre otras características.

Los no tejidos (*non-woven*), o materiales no tejidos, son un tipo de textil fabricado mediante procesos que no implican la formación de hilos y su tejido posterior. En lugar de eso, las fibras se

unen mediante diferentes métodos, como aglutinamiento mecánico, químico o térmico. Esto da como resultado un material que puede ser suave, resistente y versátil, con una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. Entre las características comunes de los no tejidos están su capacidad para filtrar y absorber líquidos. Por esta capacidad se emplean en la industria textil en el ámbito de la evaporación forzada por aire, siendo los ejemplos más frecuentes los polímeros de aramida, nylon y poliéster [25].

A continuación, se dividirán en dos grupos a los materiales más usados en la evaporación, estos son los tejidos sintéticos y los tejidos naturales.

3.4.1 Tejidos sintéticos

En las últimas décadas se ha aumentado el uso de plásticos a base de petróleo en las actividades diarias de los seres humanos y en la mayoría de los sectores, entre ellos destaca el textil. Los tejidos sintéticos llevan décadas siendo empleados en la industria por sus increíbles propiedades mecánicas, surgen como respuesta a la necesidad de materiales con las propiedades mecánicas similares a la de los metales y cerámicas, pero con una ligereza mucho mayor. Los textiles juegan un papel clave en nuestra vida cotidiana y estos materiales textiles varían ampliamente en su construcción y naturaleza química, ya que pueden provenir de fuentes naturales o pueden sintetizarse a partir de compuestos sintéticos derivados del petróleo. Debido a las numerosas ventajas de los textiles sintéticos sobre los naturales, como su resistencia, flexibilidad, resistencia al desgaste y a las arrugas, y su bajo costo, entre otros. Aunque la producción de fibras sintéticas supera la producción de fibras naturales con más del 55 % de los productos en la industria textil.

También se ha descubierto que estos materiales poliméricos dejan trazas (microplásticos) en cuerpos de agua, alimento e incluso aire. Con el aumento del uso de plásticos entre nosotros, la eliminación de plásticos se ha convertido en un importante problema de contaminación ambiental, además, los recursos de combustibles fósiles son limitados. Por todo esto se busca reemplazarlos o disminuir su consumo, mezclándolo con otros materiales [26, 27].

3.4.1.1 Tejidos sintéticos reforzados con materiales naturales

Como se menciona en el apartado anterior una posible solución a este problema es combinar materiales utilizando polímeros y fibras naturales. Además, el uso de materiales de recursos naturales es para reducir la abundancia de desechos y evitar la quema de estos desechos por parte de los agricultores que conduce a la contaminación del aire. Debido a esta situación, se han llevado a cabo diversas actividades entre ellas, programas de reciclaje, segregación de residuos por tipo y uso de materiales de productos naturales.

Cabe destacar que la producción de una amplia gama de productos que utilizan compuestos de polímero reforzado con fibra natural está creciendo. Estos compuestos son una de las alternativas para producir materiales respetuosos con el medio ambiente. El uso de estas fibras naturales tiene un gran impacto en la industria, ya que estos materiales están fácilmente disponibles, son de bajo costo y fáciles de diseñar, lo que aumenta la productividad. Un ejemplo podría ser el ácido poliláctico (PLA) mezclado con lino, algodón o incluso poda de palmera. Los polímeros reforzados con fibras naturales son una de las alternativas para reducir los problemas ambientales, ya que representan un avance en la gestión de residuos y el empleo de materias de huella de carbono cero. Las estructuras compuestas son generalmente una combinación de dos o más materiales a nivel macroscópico y ambos son insolubles. La fibra natural es un material de refuerzo incrustado en un polímero que hace de matriz. Con esto también se puede lograr un aumento de las propiedades mecánicas, dependiendo de los materiales mezclados, en su defecto solo se genera un abaratamiento de los costes. Por ello se puede llevar este concepto un paso más allá con el empleo de materiales enteramente de fibras naturales

3.4.2 Tejidos naturales

Las fibras de origen natural se pueden obtener de diversas fuentes desde fibras de corteza, raíz, hojas, frutos y tallo de diferentes plantas hasta del pelaje de animales, seda y plumas. Los más frecuentes en la industria son el yute, lino, cáñamo y soja entre otros.

En los últimos años ha habido un gran interés en el uso de fibras naturales en la fabricación de compuestos poliméricos, esto se debe a la sostenibilidad y las propiedades mecánicas que estas fibras pueden aportar. Una de las principales ventajas de los tejidos naturales es su sostenibilidad, ya que estos materiales son renovables y biodegradables, lo que los convierte en una opción más ecológica en comparación con las fibras sintéticas. Sin embargo, los tejidos naturales también presentan algunos desafíos. La mayoría de ellos son inflamables, lo que puede representar un riesgo. Además, algunos tejidos naturales, como la seda y la cachemira, pueden ser significativamente más caros que sus contrapartes sintéticas. También son susceptibles de ser atacados por la acción de plagas como las polillas.

El recurso natural al que se le da uso en este proyecto es el bambú. En la actualidad, muchos investigadores han estudiado el bambú para extraerlo en fibra y hacer de esta fibra un tejido. La selección de bambú como tejido para la evaporación de aguas salobres se debe a sus buenas propiedades mecánicas y térmicas, extracción y tratamiento de fibras, bajo costo, naturaleza respetuosa con el medio ambiente y capacidad para ser utilizado como producto en la industria. La fibra de bambú se identifica por tener fuerza y rigidez, motivos principales por los que destaca frente al resto de fibras naturales, sumado al hecho de que posee una absorción de agua idónea para realizar procesos de evaporación rápidos. Por tanto, tejidos de fibra de bambú pueden competir con las fibras convencionales y pueden utilizarse como producto en los sectores industriales, piezas de automóviles, muebles, construcción y embalajes [27-29].

3.4.3 Proceso de extracción del bambú

La fibra de bambú se obtiene del árbol de bambú y se divide en dos tipos de fibra según el flujo de proceso y método: la fibra de bambú original natural y la fibra de pulpa de bambú (también conocida como fibra de viscosa de bambú o fibra de celulosa regenerada de bambú). La fibra de bambú original se recoge directamente del bambú natural sin aditivos químicos, utilizando un método físico y mecánico. Para diferenciarla de la fibra de pulpa de bambú (fibra de viscosa de bambú), la llamamos fibra de bambú original o fibra de bambú pura. Pero la fibra de pulpa de bambú (fibra de viscosa de bambú) pertenece a la fibra de celulosa regenerada como fibra química. Hay dos tipos de procesado para obtener fibras de bambú: procesamiento mecánico y procesamiento químico. Ambos procesos incluyen inicialmente la división de las tiras de bambú, que es seguida por procesamiento mecánico o químico según el uso posterior de las fibras de bambú. La Figura 2 sirve de apoyo visual para entender mejor este proceso.

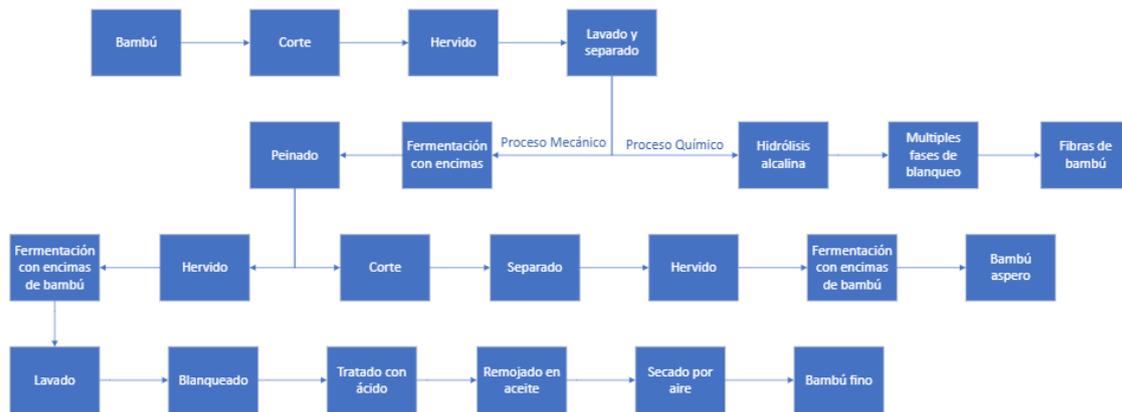


Figura 2: Diagrama de procesamiento del bambú (Elaboración propia).

El procesamiento químico incluye la hidrólisis alcalina inicial con una disolución de hidróxido sódico (NaOH) para obtener fibras de celulosa. Las fibras de celulosa tratadas con un medio alcalino luego pasan por disulfuro de carbono (CS₂) a través de un blanqueo de múltiples fases. La mayoría de los fabricantes utilizan este proceso ya que es el procedimiento rápido para obtener las fibras de bambú.

En el proceso mecánico el bambú triturado inicialmente se trata con enzimas que llevan a la formación de una masa esponjosa y con la tecnología de peinado mecánico de fibras, se obtienen fibras individuales. Los investigadores informaron de un método detallado de extracción de fibras y se dividió en preparación de bambú áspero y fino [30]. Las fibras de bambú áspero se obtuvieron mediante corte, separación, hervido y fermentación con enzimas de bambú. Mientras que, para obtener bambú fino, los pasos seguidos son hervir, fermentar con enzima, lavar y blanquear, tratamiento con ácido, remojo en aceite y secado al aire. Este método es más respetuoso con el medio ambiente en comparación con el proceso químico, aunque es menos económico. Esto se debe a que el proceso químico genera dos disoluciones que han de ser tratadas para su posterior emisión, mientras que el proceso mecánico es más caro por su mayor número de etapas.

4 Modelo matemático

En este apartado se pretende mostrar el modelo matemático empleado para el desarrollo de un sistema de evaporación natural empleando tejidos de bambú que permite el cálculo de las tasas de evaporación en diferentes condiciones de operación. Para ello en primer lugar se describirá la configuración del sistema, se continuará mostrando las ecuaciones que permiten el cálculo de las presiones de vapor en cada una de las partes del sistema, se explicará como estas permiten mediante los datos experimentales el cálculo de las constantes del modelo y por último lugar se detallará el modelo matemático obtenido que explica el proceso de evaporación de este sistema.

4.1 Configuración del sistema

A continuación, se realizará una descripción del sistema de evaporación natural a estudiar, donde se presentarán cada uno de los detalles necesarios para el desarrollo del modelo matemático.

Este sistema consta de un tejido situado en unas condiciones conocidas, donde se pretende analizar lo que sucede en la superficie de este tejido para así conocer la cantidad de agua que se evapora. Para ello se ha decidido generar un modelo alrededor del concepto de diferencias de presiones de vapor entre el líquido en la superficie del tejido y el aire, aquí es donde se produce una transferencia de materia o evaporación, debido a esto se considera que esta es la dinámica del proceso en esencia. Posterior a esta idea principal se añaden otros parámetros como la velocidad del viento que mantiene constante la diferencia de presiones de vapor entre el líquido de la superficie del tejido y el aire, puesto que es capaz de arrastrar este aire cuya humedad ha aumentado, logrando disminuirla al mezclarse con el aire. La acción del viento se añade como un factor constante a la ecuación de manera directamente proporcional [31].

4.2 Presiones de vapor

La presión de vapor es la fuerza que ejerce la fase gaseosa para que las moléculas escapen de la fase líquida a la gaseosa. Teniendo esto en cuenta se puede entender que gracias a esta característica de los fluidos podemos calcular la cantidad de agua que se evapora por superficie en un tiempo determinado, es decir, la tasa de evaporación.

4.2.1 Presión de vapor del aire

Para el cálculo de la presión de vapor del aire se necesita conocer la presión de vapor del aire saturado mediante la siguiente ecuación:

$$Pv_a = \frac{HR}{100} \cdot Pv_{sat} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde HR es la humedad relativa del aire en %.

La presión de vapor del aire saturado hace referencia a la máxima cantidad de agua que es capaz de absorber el aire a cierta temperatura. Esta es la ecuación que lo expresa:

$$Pv_{sat} = \frac{e^{(34,494 - \frac{4924,99}{T+237,1})}}{(T + 105)^{1,57}} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde T es la temperatura del aire en °C.

El aire que posee una presión de vapor saturada es aquel que se sitúa en contacto con el tejido y es donde sucede la transmisión de materia del proceso o la evaporación. Esto complica el cálculo de la tasa de evaporación, puesto que se debería calcular la transferencia de materia en las diferentes láminas de aire situadas alrededor del tejido. Aunque, ahora bien, al estar el sistema

bajo el efecto de una corriente de viento podemos asumir que el viento normaliza e iguala las características del aire, logrando así que se mantenga constante en la superficie del tejido la diferencia de presiones [32].

4.2.2 Presión de vapor de bulbo húmedo

El concepto de presión de vapor de bulbo húmedo hace referencia a la presión de vapor de la superficie del tejido cuando este está sufriendo una evaporación. Lo que esto significa es que la evaporación es un proceso que requiere energía, esta puede venir de diversas fuentes, un ejemplo es el choque entre moléculas que puede ocasionar que una de ellas obtenga la energía suficiente como para evaporar hacia la fase gaseosa, dejando a la fase líquida con menor energía, lo que se traduce en un descenso de la temperatura. La mínima temperatura que puede adquirir la fase líquida se denomina temperatura de bulbo húmedo y la presión de vapor asociada a esta temperatura se conoce como presión de vapor de bulbo húmedo.

Esta es la ecuación que permite el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo:

$$T_w = T \cdot \operatorname{atan}(0,151977 \cdot (HR + 8,313659)^{0,5}) + \operatorname{atan}(T + HR) - \operatorname{atan}(HR - 1,676331) + 0,00391838 \cdot (HR^{1,5}) \cdot \operatorname{atan}(0,023101 \cdot HR) - 4,686035 \quad (\text{Ec. 3})$$

donde T es la temperatura del aire en °C y HR es la humedad relativa del aire en %.

Esta es la ecuación usada para el cálculo de la presión de vapor de bulbo húmedo:

$$P_{v_w} = 10^{(A(m) + \frac{B}{T_w + 273} + \frac{C}{(T_w + 273)^2})} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde A , B y C son constantes de la ecuación de Antoine y T_w es la temperatura de bulbo húmedo en °C.

Para los valores de B y C se pueden encontrar tabulados (referencia cruzada). Pero para el caso de A esta depende de la molaridad de las especies disueltas, la ecuación que lo expresa es la siguiente:

$$A = A_0 + A_1 \cdot m + A_2 \cdot m^2 + A_3 \cdot m^3 \quad (\text{Ec. 5})$$

donde A_0 , A_1 , A_2 y A_3 son valores de la ecuación de Antoine y m representa la molaridad de la especie en cuestión en mol/kg [33].

Por un lado, para el cálculo de las constantes de Antoine se siguió el procedimiento descrito en el apartado *Determinación de presiones de vapor para las aguas salobres*. Por otro lado, para el cálculo de la molaridad es necesario saber el conjunto de especies disueltas en la disolución, pero esto es complejo, por ello se puede normalizar la relación de la conductividad respecto a la concentración de NaCl, pudiendo así comparar la conductividad de nuestras aguas a las de una disolución de agua con NaCl como única especie disuelta, pudiendo simplificar el cálculo [34].

Para el cálculo de la molaridad de NaCl se usaron las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{c}{\rho} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$c = 0,5903 \cdot \operatorname{cond} - 0,0332 \quad (\text{Ec. 7})$$

donde c hace referencia a la concentración de la especie disuelta en g/L, ρ hace referencia a la densidad del agua en kg/m³ y cond a la conductividad de la disolución en mS/cm [35].

4.3 Modelo y límites de funcionamiento

En este apartado se mostrará la ecuación principal del modelo junto. Además, se comentarán los límites de funcionamiento que presenta el modelo.

4.3.1 Modelo

Una vez expresadas todas las partes del modelo se procede a presentar este con la siguiente ecuación [36]:

$$\text{Tasa de Evaporación} = K_1(v) \cdot (Pv_w - Pv_a) + K_2(v) \quad (\text{Ec. 8})$$

En la Tabla 1 se recogen los valores de las constantes expresadas a lo largo del desarrollo del modelo matemático:

Tabla 1: Constantes del modelo matemático

Símbolo	Caracterización	Valor	Unidades
A_0	Constante en la ecuación de Antoine	4,03	-
A_1	Constante en la ecuación de Antoine	$-1,13 \cdot 10^{-4}$	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
A_2	Constante en la ecuación de Antoine	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$\text{kg}^2 \cdot \text{mol}^{-2}$
A_3	Constante en la ecuación de Antoine	$-6,98 \cdot 10^{-7}$	$\text{kg}^3 \cdot \text{mol}^{-3}$
B	Constante en la ecuación de Antoine	307,86	-
C	Constante en la ecuación de Antoine	-403748	-
cond	Conductividad del agua salobre	3,9	$\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$
ρ	Densidad del agua	997,87	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

4.3.2 Límite de funcionamiento

Este modelo presenta un inconveniente al trabajar con diferencias de presiones de vapor cercanas al cero. Estas dificultades que se pueden observar se deben a que el modelo en una diferencia de presiones de vapor nula sigue existiendo una tasa de evaporación (por factores asociados al viento) cuando esta también debería ser nula. Otro motivo de este problema en el funcionamiento del modelo puede ser que la tendencia entre la diferencia de presiones de vapor y tasa de evaporación deje de ser lineal en ese segmento de la gráfica, cosa que el modelo no tiene en cuenta. Destacar que esta pequeña o nula diferencia entre las presiones de vapor de bulbo húmedo y del aire puede deberse a una temperatura muy baja o una humedad relativa muy alta.

5 Materiales y metodología

Con el fin de que los ensayos sean reproducibles se comentarán los materiales, equipos, métodos y técnicas usadas. Para ello dividiremos en seis apartados con todo el contenido necesario. En el primer apartado se comentarán de los residuos de aguas salobres, en el segundo se mostrarán los materiales y equipos empleados, en el tercero se hablará de las técnicas empleadas, en el cuarto se explicará la obtención de datos climáticos, en el quinto se desarrollará el procedimiento seguido y en el sexto del ajuste de datos realizado.

5.1 Residuos de aguas salobres

A continuación se describirán las diferentes aguas con las que se trabajarán en este estudio. Se relatarán detalles como la composición, color y turbidez.

5.1.1 Aguas sintéticas

Como muestra a comparar con el agua residual se hizo un agua salobre sintetizada en el laboratorio, formada por 4 reactivos conocidos:

- Bicarbonato de sodio (NaHCO_3)
- Nitrato de potasio (KNO_3)
- Cloruro de sodio (NaCl)
- Sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Los reactivos mencionados anteriormente se muestran en la Figura 3.

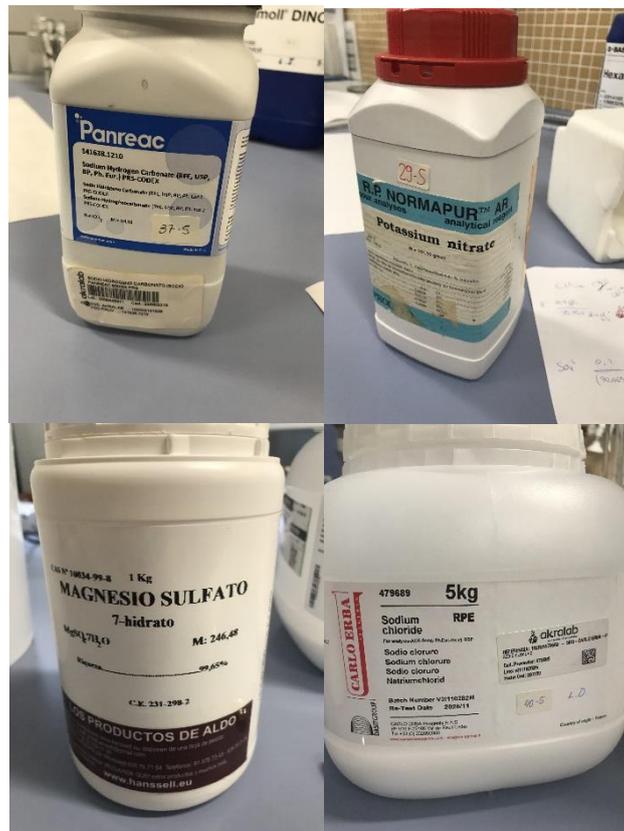


Figura 3: Reactivos

Se pretende emular las condiciones del agua a recibir de la empresa, se intentó lograr una conductividad similar y unas concentraciones de iones Cl^- y SO_4^{2-} para la concentración de

cloruros se usó NaCl, para la concentración de sulfatos se usó $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y para la conductividad se usaron NaHCO_3 y KNO_3 . Como resultado tenemos un agua salobre que es completamente incolora y no presenta turbidez o sólidos en suspensión.

5.1.2 Aguas salobres

Los residuos de aguas salobres usados provienen de la empresa Pascual y Bernabéu. Como se observa en la Figura 4 esta agua presenta una tonalidad amarillenta. Puesto que esta agua ya estaba filtrada no presenta sólidos en suspensión o coloides, es totalmente traslucida.



Figura 4: Aguas salobres filtrada.

Por otro lado, tenemos el agua salobre entregada por la empresa después de ser filtrada y evaporada, esta será el agua a ensayar, como se observa en la Figura 5 presenta un color con una tonalidad más oscura y cercana al marrón que el agua anterior y después de unos días en reposo se comenzaron a depositar unos pocos coloides.

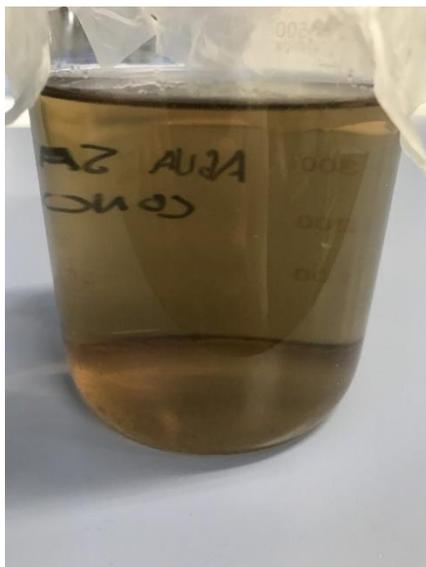


Figura 5: Agua salobre concentrada.

5.2 Materiales y equipos

En este apartado se describirán los materiales y equipos a los que se les ha dado uso a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Se dividirán en dos apartados. Por un lado, en el material y equipo usado para la caracterización y tratamiento previo de las aguas salobres. Por otro lado, los materiales y equipos usados en los ensayos de cámara.

5.2.1 Caracterización y tratamiento previo de las aguas salobres

A continuación, se muestran los equipos y materiales usados en las técnicas de caracterización de aguas y en su previo tratamiento, se muestran imágenes acompañadas de una breve descripción.

5.2.1.1 Conductividad y pH



Figura 6: PCE-PHD 1.

Este equipo es capaz de medir la conductividad y el pH de las disoluciones con las que se trabaje. El modelo es PHD 1. En la imagen de la izquierda de la Figura 6 se observa el equipo desmontado con su manual de instrucciones, en la imagen de la derecha se aprecian la sonda de pH en su disolución patrón y la sonda de conductividad.

5.2.1.2 Test de DQO

En la Figura 7 se aprecia el test de demanda química de oxígeno y los viales para cada ensayo, estos viales presentan un QR para que el espectrofotómetro pueda detectar automáticamente el tipo de ensayo.

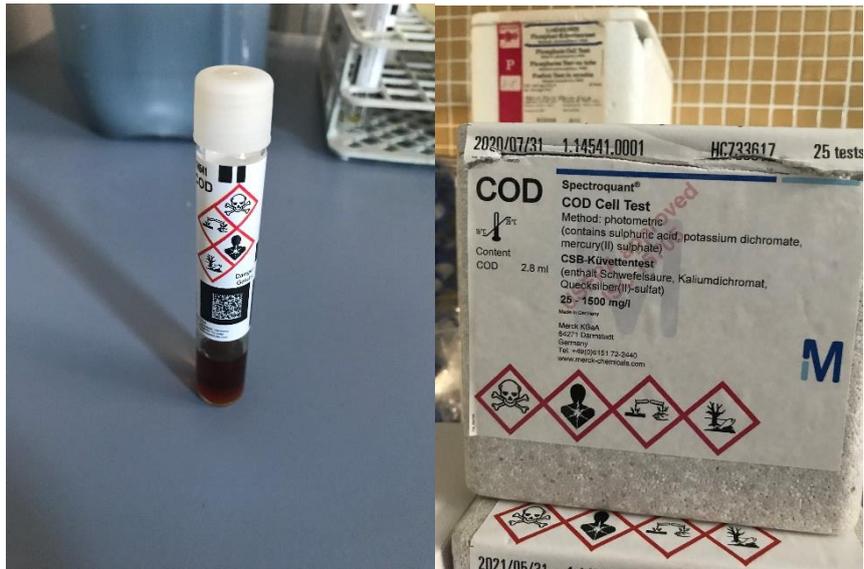


Figura 7: Test de DQO y vial.

El Termorreaktor se muestra en la imagen de la Figura 8 del modelo Thermoreaktor TR300. Después está el espectrofotómetro que se muestra en la derecha capaz de leer el QR de los viales para cuantificar en este caso la concentración de oxígeno y medir la absorbancia, del modelo Prove 100.



Figura 8: Termorreaktor y espectrofotómetro.

5.2.2 Determinación de presiones de vapor

A continuación, se presentan los equipos y materiales usados para la recopilación de datos para el cálculo de las constantes de Antoine, como se detalla en el apartado *Determinación de presiones de vapor para las aguas salobres*.



Figura 9: Equipos para la determinar presiones de vapor.

El intercambiador de calor se muestra a la izquierda en la Figura 9 del modelo RE104. Mientras que el reactor el reactor encamisado se observa en la imagen de la derecha.

5.2.3 Ensayos de evaporación

Ahora se describirán los materiales y equipos usados en los ensayos de evaporación en cámara climática.

5.2.3.1 Cámara climática

En la Figura 10 se muestra la cámara climática por fuera y por dentro empleada para los ensayos de evaporación.



Figura 10: Cámara climática

En la Figura 11 se muestra el conjunto de elementos con los que se realizan los ensayos dentro de la cámara climática, estos elementos son una balanza dispuesta en el interior con un sistema de soporte para los tejidos de bambú, la sonda del termohigrómetro, un ventilador adicional para aumentar la velocidad del aire por encima de las capacidades de la cámara.

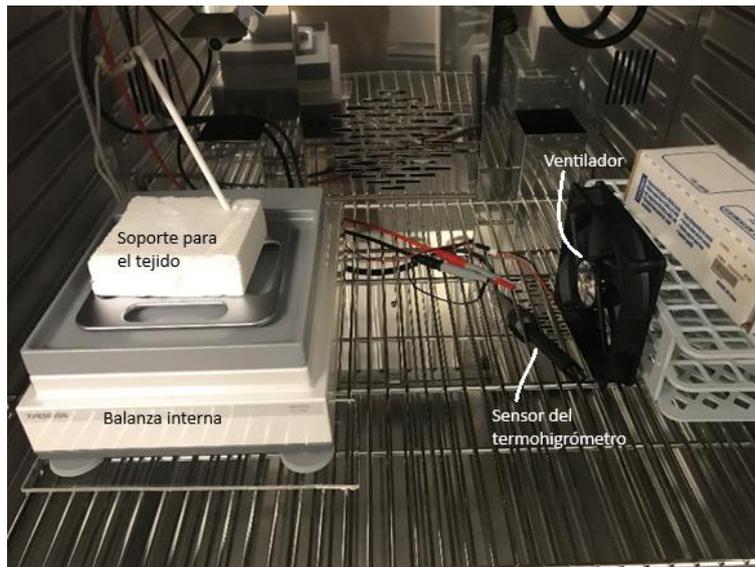


Figura 11: Sistema diseñado para los ensayos en cámara climática.

5.2.3.2 Termohigrómetro

Este equipo consta del dispositivo que se muestra en la Figura 12, este recopila y muestra la información de temperatura y humedad relativa que la sonda en el interior de la cámara está midiendo. La sonda mencionada es la que aparece en la Figura 11. Este equipo es capaz tomar medidas en tiempo real de la temperatura y la humedad relativa para su posterior uso en el modelo matemático.



Figura 12: Termohigrómetro

5.2.3.3 Balanzas

En este proyecto se le ha dado uso a un total de 3 balanzas diferentes.

Por un lado, hay una situada en el interior de la cámara climática del modelo XPR303SN se puede ver en la Figura 11 esta balanza posee una gran precisión. Además, tiene una pantalla la cual se aprecia en la Figura 13, donde se muestran los datos y permite registrar la evolución de la masa

de agua en el tejido respecto al tiempo, tomando medidas que en el caso de este proyecto el tiempo de muestreo es de 1 seg. La extracción de datos se realiza por los puertos USB de la zona posterior de la balanza interior.



Figura 13: Pantalla de la balanza interna.

Por otro lado, también hay otras dos balanzas externas. La primera balanza se muestra en la imagen de la izquierda de la Figura 14, es del modelo TB-224A. Esta balanza se usará para el pesaje de los tejidos, previo a la realización de los ensayos. Posee cuatro decimales de precisión que cuenta con pantalla antiviento que la aíslan por completo a la hora de tomar medidas. También cuenta con soporte para colocar los tejidos, para evitar posibles pérdidas de agua, debidas a apoyar el tejido en una superficie y que el agua por tensión superficial se adhiera a esta superficie. La segunda balanza externa se usará para los pesajes de los vasos con y sin las aguas residuales para los ensayos de evaporación natural, posee dos decimales de precisión se muestra en la imagen de la derecha de la Figura 14, es del modelo Zero Tare.



Figura 14: Balanzas

5.3 Técnicas

En este apartado se describen el conjunto de técnicas empleadas a lo largo del desarrollo de trabajo de fin de grado. Explicando en qué consisten y la manera correcta de proceder en el laboratorio.

Casi todas ellas están centradas en el tratamiento previo de los residuos de aguas salobres, comenzando por su caracterización y siguiendo con las técnicas usadas para la concentración de estos residuos, logrando que se asemejen a las aguas de rechazo de un proceso de osmosis inversa. Por último, se especifica la técnica que se ha de emplear para humedecer los tejidos a ensayar

5.3.1 Caracterización de aguas

Este trabajo pretende estudiar la mejora que supone la adición de un sistema de evaporación natural asistida por aire al tratamiento de aguas salobres. Para ello es necesario un estudio previo de estas aguas, donde se puedan caracterizar y determinar las especies disueltas en el agua. A continuación, se especifican las técnicas empleadas para la caracterización de aguas salobres.

5.3.1.1 Medición de pH

Para realizar medidas de pH se utilizó un medidor de pH PHD 1 de marca PCE. Para las medidas de pH de una disolución se ha de tener la disolución a medir y un agua destilada. Esto es para poder limpiar la sonda después de cada medida, evitando así que se ensucie y pueda dar datos erróneos. Destacar que el equipo trae una disolución patrón con la que ajustar el pH. Se realizarán 3 medidas, de las que si alguna presenta un valor anómalo será descartada y con el resto se realizará una media para evitar en la medida de lo posible el error.

5.3.1.2 Medición de conductividad

Para realizar medidas de conductividad se utilizó el mismo equipo que para el pH. Este contiene otra sonda en su kit capaz de medir la conductividad. Para las medidas de conductividad se procede de igual manera que para el pH. La única diferencia es que para la conductividad no hay una muestra patrón. Pero de igual manera se medirá 3 veces y el quipo se limpiará con agua destilada, para evitar la presencia de trazas

5.3.1.3 Medición de DQO

Para la medida de materia orgánica disuelta en el agua salobre se realizará un test de demanda química de oxígeno. Para ello se usó un test COD Cell Test de la empresa Spectroquant, donde se añaden 3 mililitros de las disoluciones preparadas en los viales del Test. Para llevarlo a calentar en un termorreactor a 150 °C durante 120 min. Después se deja enfriar y a temperatura ambiente se realizan las medidas de concentración.

5.3.2 Absorción de líquido de los tejidos

Esta actividad está sujeta a la normativa de “Métodos de ensayo para los no tejidos Parte 6: Absorción” [37], por la cual los tejidos han de sumergirse durante un minuto con una sección de 50 x 60 mm², para posteriormente dejarse escurrir de forma oblicua durante dos minutos, de esta manera se elimina el agua sobrante que pueda gotear. Un goteo en los ensayos puede dar lugar a una pérdida abrupta de masa, que sea contabilizada como evaporación, esto daría lugar a un error no deseado.

5.4 Obtención de datos

Para poder realizar los ensayos en cámara se han buscado datos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Para esta tarea se utilizó la página web *Nasa Power*, en la opción de *Data Access* permite marcar una ubicación en concreto. Con esta herramienta se extrajeron los siguientes datos de la localidad de Cocentaina:

- Temperatura promedio
- Humedad relativa
- Velocidad del aire promedio

Estos datos se recaban por días del intervalo de fechas seleccionado. Lo siguiente es calcular los promedios mensuales y se representará gráficamente para una mayor facilidad de su comprensión.

5.5 Procedimiento

A continuación, se explicarán los pasos seguidos en la realización de este trabajo de investigación, con la finalidad de que se muestre el desarrollo experimental realizado.

5.5.1 Aguas sintéticas

Como se menciona en el apartado *Residuos de aguas salobres*, se generó un agua sintética, para ello se usaron los 4 reactivos anteriormente descritos. Los cloruros presentaban una concentración promedio de 0,4 g/L y los sulfatos de 0,2 g/L. Se realizaron cálculos con los datos de cloruros y sulfatos disueltos para conocer la cantidad de las sales a añadir.

Se procedió siempre con bata y guantes, primero se pesaron en balanza TB-224A y se añadieron 0,3 gramos de NaCl, 0,25 gramos de MgSO₄, 0,5 gramos de NaHCO₃ y 0,2 gramos de KNO₃ en 500 mL de agua destilada. Después se agitó hasta que quedasen completamente disueltos. Estos reactivos se muestran en la Figura 3.

Luego se caracterizaron estas aguas, tal y como se especifica en el apartado *Caracterización de aguas*. Una vez se sintetizaron las aguas se prosiguió con los ensayos en cámara climática.

5.5.2 Aguas residuales

La empresa Pascual y Bernabéu facilitó unas aguas salobres de alimento de un proceso de osmosis, pero estas estaban sin caracterizar, además de que las aguas que se pretenden estudiar son del rechazo del proceso de ósmosis

Las aguas facilitadas por la empresa fueron caracterizadas como se indica en el apartado *Caracterización de aguas*. Posteriormente se extrajo el agua salobre por gravedad, para ello se necesita de un tubo plástico o una manguera y una jeringuilla para generar vacío, de esta forma se evita que al inclinar el bidón los sedimentos o coloides que han precipitado en el fondo se remuevan. En la Figura 15 se muestra el bidón y la manguera usadas.



Figura 15: Bidón de aguas salobres.

Para el filtrado de aguas salobres se utilizó papel de una densidad específica, capaz de evitar el paso de coloides y partículas de gran tamaño, plegándolo para insertarlo en el embudo de decantación en forma de cono, se introdujo en un embudo. Este embudo se situó en un soporte con una jarra en su parte inferior, logrando así filtrar las aguas, puesto que el agua poseía coloides y otros sedimentos en la base del bidón. En la Figura 16 se pueden observar los diferentes elementos y la forma de proceder.



Figura 16: Filtrado de aguas salobres.

Por último, las aguas salobres se evaporaron en estufa, para ello se sitúa el agua a evaporar en un recipiente y se lleva a una estufa para así reducir su volumen mediante evaporación. Con la finalidad de reducir su volumen, aumentando su concentración de las sales disueltas. Se puede ver en la Figura 17 la estufa usada y el recipiente donde se llevó a cabo la evaporación.



Figura 17: Proceso en evaporación en estufa.

Una vez listas se volvieron a caracterizar, para conocer su estado actual. Tras comprobar que se asemejaban a unas aguas de rechazo de osmosis inversa se procedió a los ensayos en cámara.

5.5.3 Datos climáticos

Como se explica en el apartado *Obtención de datos* se obtuvieron datos que abarcan desde el año 2016 hasta el año 2023. A continuación, en la Figura 18 se aprecia la evolución de la temperatura a lo largo el año 2016.

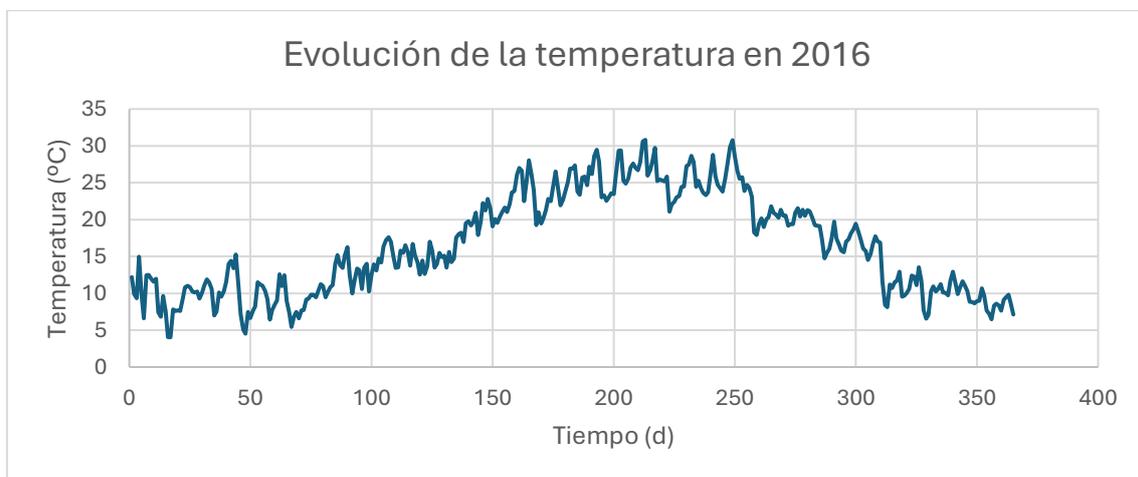


Figura 18: Evolución de la temperatura de Cocentaina en 2016.

Ahora bien, los datos presentes tienen una gran varianza entre los distintos meses por las diferentes condiciones que presentan. Para una mejor gestión estos datos del año 2016 hasta el 2023 se agruparon por meses y se calcularon las medias. Destacar que aquí solo se representa la temperatura del año 2016, pero se hizo lo mismo para la variable de humedad relativa y velocidad del viento para todos los años. Como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos obtenidos de Cocentaina 2016-2023.

Mes	HR (%)	T (°C)	V (m/s)
Enero	73,32	7,64	4,50
Febrero	71,05	9,37	4,50
Marzo	67,53	11,39	5,15
Abril	65,31	11,65	4,40
Mayo	59,17	12,27	3,79
Junio	52,36	23,45	2,96
Julio	50,06	26,83	2,95
Agosto	53,25	26,45	2,83
Septiembre	63,68	22,02	3,00
Octubre	67,73	17,66	3,10
Noviembre	71,32	11,79	4,33
Diciembre	74,77	9,56	4,36

Con este cálculo de las medias se pudo decidir qué condiciones se ensayarían en la cámara. Los ensayos se dividieron en meses representativos de las diferentes estaciones del año. Teniendo así meses de invierno, meses de verano y un mes que representa las condiciones presentes en primavera y otoño.

Se estudiaron con mayor exactitud los meses de invierno, debido a que son las condiciones más adversas y las más favorables respectivamente. Para conocer cuando es óptimo un proceso de las características del que se desarrolla en este trabajo de fin de grado, puesto que meses con baja temperatura y alta humedad, puede no ser deseable tener el proceso en funcionamiento. Por otro lado, en el resto de los meses se realizará un estudio de las tasas de evaporación para así saber el rendimiento que puede alcanzar un proceso de estas características, en todas las condiciones conocidas. También es interesante tener un mayor conjunto de datos para el desarrollo del modelo matemático.

Los ensayos a realizar recibieron los nombres característicos en función de los meses que representan estas humedades relativas y temperaturas. Los datos tomados se basan en las condiciones de la Tabla 2, pero no todos los meses se pueden ensayar porque la cámara climática no puede operar en todas las condiciones. Por ello se hizo una selección de los cinco meses de condiciones más relevantes. Además, se procuró que estos meses guardasen algún tipo de similitud o diferencia que posteriormente pueda ser analizada, es decir, por un lado, entre los meses de Marzo y Noviembre se mantuvo la temperatura similar y se pretende comprobar la relevancia de un cambio de un 5 % en la humedad relativa. Por otro lado, entre los meses de Octubre y Marzo o los meses de Noviembre y Septiembre se mantuvo con valores similares la humedad relativa variando la temperatura. Todo esto facilita la comparación de los futuros resultados, en la Tabla 3 se puede observar todo lo descrito anteriormente.

Tabla 3: Condiciones a ensayar.

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)
Julio	26,8	50
Septiembre	22	63,5
Octubre	17,7	68
Noviembre	11,7	62,5
Marzo	11,4	67,5

Destacar que esto 5 ensayos se realizaron 3 veces, variando la velocidad del aire:

- El 100% del ventilador equivale a 1 m/s de viento.
- El 50% del ventilador equivale a 0,53 m/s de viento.
- El 10% del ventilador equivale a 0,22 m/s de viento.

Para conocer la velocidad del viento a la que equivale la potencia del ventilador se realizaron diversos estudios con un anemómetro dentro de la cámara, pudiendo así conocer la velocidad del viento para cada potencia del ventilador.

5.5.4 Preparación de tejidos

Para la elaboración de los tejidos se cortaron unidades a ensayar de 50 x 75 mm² de tejido se observa uno de los tejidos en la Figura 19. Posteriormente se marcó una sección de 50 x 60 mm², esta será la que se sumerja en las aguas residuales siguiendo el procedimiento descrito en el apartado *Absorción de líquido de los tejidos*.



Figura 19: Tejido de bambú.

5.5.5 Determinación de presiones de vapor para las aguas salobres

Estos ensayos se realizan con el objetivo de calcular las constantes de Antoine, para ello se ha de colocar agua salobre de diferentes molaridades en el interior del reactor encamisado y hacer pasar por la camisa un fluido a diferentes temperaturas, todo esto mientras se mide la humedad relativa en el equilibrio líquido-vapor del agua salobre que se encuentra en el núcleo.

Las constantes mencionadas son usadas en la (Ec. 4) y en la (Ec. 5).

5.5.6 Ensayo en cámara

La cámara puede trabajar en un amplio espectro de temperaturas y humedades relativas, pero evitando la condensación de agua en las paredes, el equipo se podría dañar.

El procedimiento usado para los ensayos en cámara consta de los siguientes pasos:

- Tarar la báscula interna con el tejido con el que se realizará el ensayo.
- Introducir las condiciones de consigna y esperar a que se alcancen, es importante destacar que, si son condiciones de bajas temperaturas y altas humedades relativas, es necesario hacer escalones para llegar a las condiciones de consigna, preferentemente colocar una humedad relativa cercana a la que se pretende usar e ir haciendo escalones para bajar la temperatura a la deseada, para finalmente hace un escalón, donde aumente la humedad

relativa a la necesaria a usar. En todo este proceso dejar el ventilador al máximo de velocidad para que las condiciones lleguen antes a consigna.

- Sera necesario extraer el tejido, para ello se baja el ventilador a la mínima potencia, rápidamente se extrae y con menor apertura posible para mantener las condiciones de la cámara.
- Mientras se espera a que las condiciones de consigna se vuelvan estables se debe tarar la báscula exterior con el tejido.
- Una vez alcanzadas las condiciones de consigna se procederá con el ensayo, para ello aplicar la normativa descrita en el apartado *Absorción de líquido de los tejidos*.
- Pesar tejido húmedo y devolver a la cámara. Para ello se baja el ventilador a la mínima potencia, rápidamente se introduce y con menor apertura posible para mantener las condiciones de la cámara, colocar la velocidad del ventilador a ensayar. Iniciar el programa de medición de la balanza y termohigrómetro. Apunta masa de agua.
- La duración de los ensayos dependerá de la velocidad del ventilador, 30 min de ensayo a 100 % de velocidad, 45 min de ensayo a 50 % de velocidad y 60 min de ensayo a 10 % de velocidad.
- Una vez finalizado el ensayo se para el conteo de datos del termohigrómetro y balanza, para los datos de la balanza se deben exportar a un Pendrive, este puede ser colocado antes del ensayo y dejar dentro durante todo el ensayo o abrir la cámara e introducir al final de este. Para la extracción de datos del termohigrómetro se usará un programa informático, llamado *Confort Software*, aunque este posee una memoria interna, por lo que se pueden realizar varios ensayos consecutivos.

5.5.7 Ensayo de evaporación natural

El procedimiento usado para los ensayos de evaporación natural consta de los siguientes pasos:

- Se seleccionaron 6 vasos, donde se dividieron en 2 grupos con diferentes secciones y se enumeraron.
- Se midió el diámetro interno de los vasos utilizados con un pie de rey, para el posterior cálculo del área de evaporación.
- Se dispuso una cantidad cercana a los 50 mL de aguas salobres en cada vaso.
- Se tomaron medidas de masa de cada vaso sin el agua residual y con ella. Cada día se tomará una medida de peso para controlar la evaporación que estos sufren, para posteriormente conocer su tasa de evaporación.

En la Figura 20 se muestra el ensayo de evaporación natural.

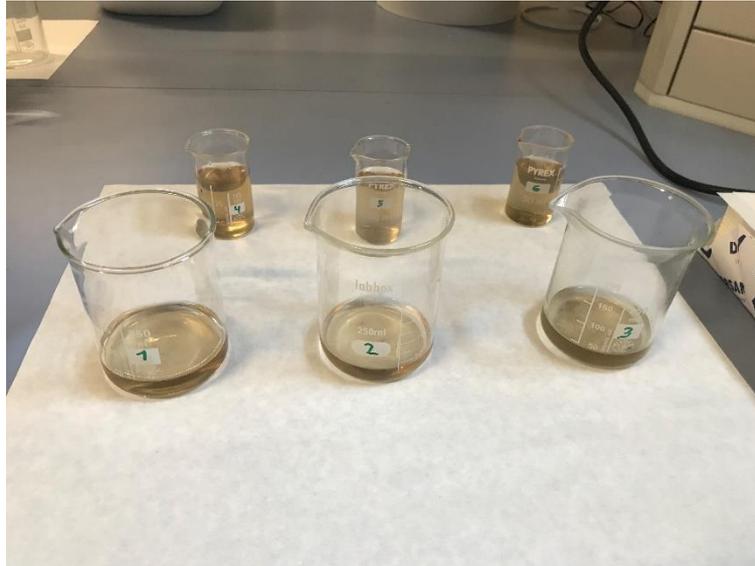


Figura 20: Ensayo de evaporación natural.

5.6 Ajuste de datos

Los ensayos en los que se ha trabajado en el laboratorio se han medido con una balanza y un termohigrómetro, dando lugar a unos conjuntos de datos que han de ser tratados para su correcta interpretación.

5.6.1 Tratamiento de datos

Tenemos dos fuentes de datos, los de la balanza y los del termohigrómetro. Estos datos se almacenaron en archivos de Excel donde luego se ajustaron con el programa Matlab 2023b.

Primero se cargaron en dos archivos diferentes uno para la balanza y otro para el termohigrómetro. En cada uno se trabajaron los datos para su posterior uso en Matlab. A los datos de la balanza se le aplicaron ajustes de datos para eliminar las perturbaciones generadas por los movimientos que sufría el tejido debido al aire con el comando *smooth*, mediante un *function*. A los datos del termohigrómetro se le calcularon las medias de temperatura y humedad relativa.

5.6.2 Cálculo de tasas de evaporación

Por último, se calcularon las tasas de evaporación y se representaron gráficamente los resultados. Para poder realizar una comparación entre los diferentes ensayos. Para el cálculo de las tasas de evaporación se seleccionan los datos donde se produce la evaporación, dejando fuera aquellos datos que ya no se esté evaporando. Se calcula el área de la tela y se pasan las unidades de masa a kg, de superficie a m^2 y las de tiempo a segundos. Por último, se ha de invertir los datos de la balanza para poder evaluar la masa evaporada, puesto que miden el peso de agua presente en el tejido. Para ello se resta cada valor al dato previamente medido en balanza para conocer el agua evaporada. La tasa de evaporación es la representación de esta masa evaporada entre la superficie respecto del tiempo, la tendencia que nace de esta representación es la tasa de evaporación.

6 Resultados

En este apartado se mostrarán los resultados y cálculos realizados. Empezando por la caracterización de las diferentes aguas, siguiendo con los diferentes ensayos realizados y el estudio de las tasas de evaporación.

6.1 Caracterización de las aguas salobres

A continuación, se recopilan los datos que reflejan las propiedades de las aguas estudiadas, desde las aguas sintéticas usadas como base del estudio, hasta las aguas facilitadas por la empresa Pascual y Bernabéu. Estas últimas se dividen en las propias aguas facilitadas por la empresa y las concentradas mediante evaporación.

6.1.1 Aguas salobres sintéticas

Para la obtención de unas aguas salobres sintéticas de las características esperadas de un agua salobre de una industria se hizo un pequeño estudio donde se observaron las características de un caudal de aguas salobres. Se trataron de emular estas condiciones para ello se adicionaron los solutos mencionados en el apartado de *Aguas sintéticas* logrando los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Propiedades del agua salobre sintética.

Propiedad	Medida
Conductividad (mS/cm)	1,61
Bicarbonatos (g/L)	1
Potasio (g/L)	0,4
Cloruros (g/L)	0,6
Sulfatos (g/L)	1,2

En la Tabla 4 se puede observar que los sólidos totales disueltos rondan en conjunto el dato de 3,2 g/L que es superior a 1 g/L del agua dulce e inferior de los 35 g/L del agua marina. Sería considerada un agua salobre de baja salinidad (de 1 a 5 g/L).

6.1.2 Aguas salobres de la empresa

Para la caracterización de estas aguas se realizó un proceso de filtración y estudios de conductividad, pH y demanda química de oxígeno. Estos datos se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Caracterización de aguas salobres de la empresa.

Propiedad	Medida
Conductividad (mS/cm)	2,32
pH	8,21
DQO (mg/L)	144

En la Tabla 5 se observan unos datos no relacionables con la salida de un proceso de ósmosis inversa. Por ello se decidió concentrar esta agua salobre mediante un proceso de evaporación en estufa para que los datos se asemejen a los de un agua salobre producto de un caudal de rechazo de un proceso de ósmosis inversa.

6.1.3 Aguas salobres concentradas

Las aguas salobres concentradas surgen tras un proceso de evaporación en estufa. Estas aguas concentradas requieren de un nuevo estudio de caracterización, para ello se realizaron medidas de pH, conductividad y demanda química de oxígeno. Estos datos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Caracterización de aguas salobres concentradas.

Propiedad	Medida
Conductividad (mS/cm)	3,90
pH	9,34
DQO (mg/L)	152

En la Tabla 6 se pueden observar datos de un agua salobre con una conductividad mucho mayor que las anteriores, típica de un agua salobre de un caudal de rechazo de un proceso de ósmosis inversa.

6.2 Ensayos en cámara climática

Ahora bien, en este apartado se expondrán en profundidad los resultados de los ensayos realizados en cámara climática. Se segmentará en diferentes apartados, teniendo criterios de evaluación diferentes y parámetros diferentes a comparar. Esta separación se realiza para entender cuan trascendente es cada variable en un proceso de evaporación. Destacar que debido a la variabilidad de las condiciones de operación se dificulta su comparación.

6.2.1 Comparación ajustes

A continuación, se mostrarán diferentes gráficas, donde se observarán los datos directamente tomados y los datos después del proceso de ajuste que se explica en el apartado *Ajuste de datos*, para así entender la función que desempeña el tratamiento de datos.

Para empezar en la Figura 21 se muestra una comparación entre los datos de Julio con un 100% de potencia en el ventilador. Como se puede observar al tener el ventilador a máxima potencia los datos sin ajuste presentan una gran dispersión, pero en los datos con ajuste no se observa esta problemática. Esta corrección en los datos permite saber el tiempo donde termina el proceso de evaporación, para seleccionar el conjunto de datos con los que calcular la pendiente, siendo esta la tasa de evaporación de cada ensayo.

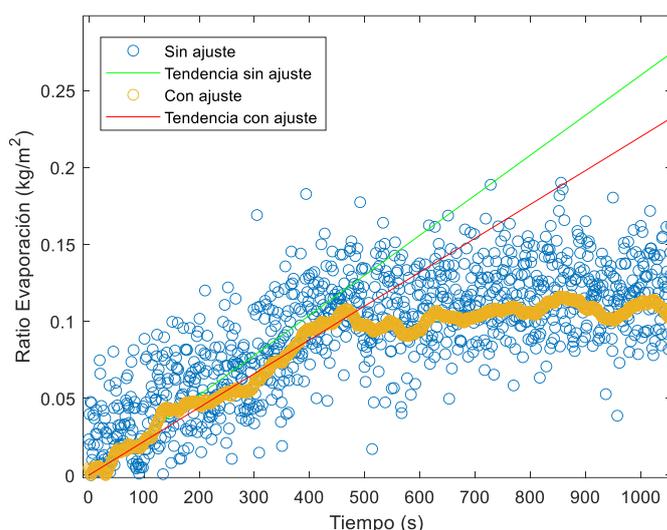


Figura 21: Ajuste datos de Julio a 100 % de potencia del ventilador.

Otro caso pueden ser los ensayos a un 50 % de potencia del ventilador como se muestra en la Figura 22 comparando los datos de Julio de 50 % de potencia en el ventilador. En estos casos el ajuste sigue siendo necesario para una mejor interpretación de los datos.

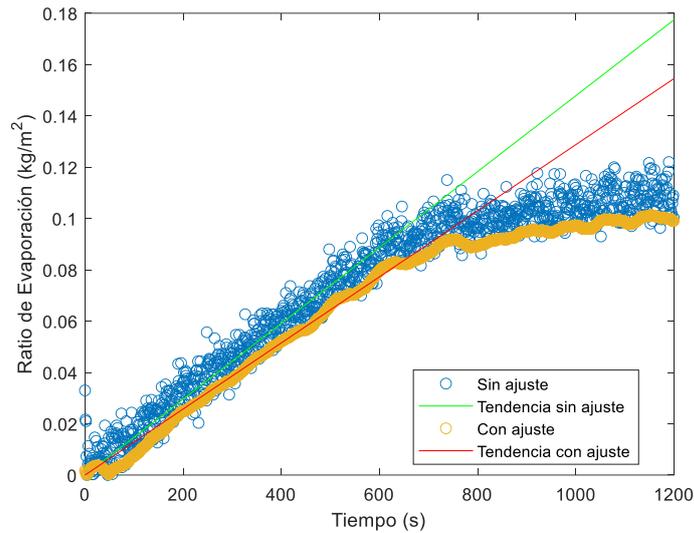


Figura 22: Ajuste de Julio a 50 % de potencia del ventilador.

Un último caso donde se puede ver el trabajo del ajuste de datos es en los ensayos a un 10 % de potencia del ventilador, en la Figura 23 se muestra una comparación entre los datos de Julio con un 10 % de potencia en el ventilador. Aquí se puede ver que el ajuste no termina de ser necesario, no se observan grandes diferencias ni en los datos ni en las tendencias.

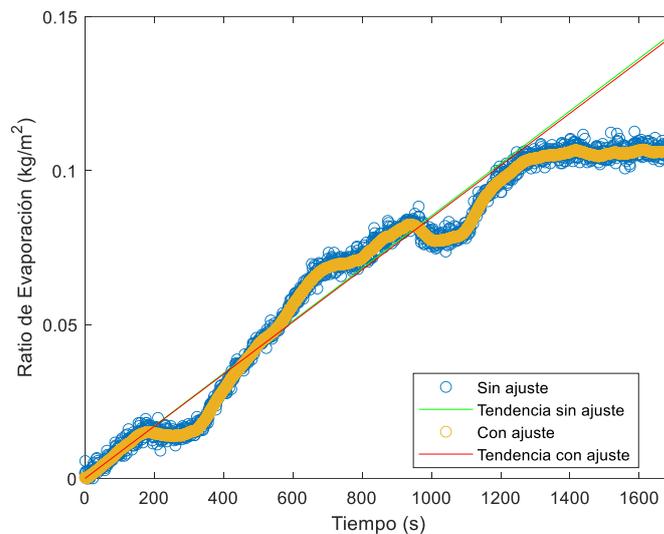


Figura 23: Ajuste de Julio a 10 % de potencia del ventilador.

En las Figura 21, Figura 22 y Figura 23 anteriormente mencionadas se puede observar el gran trabajo del ajuste de datos. Por esto a partir de este punto se mostrarán solo los datos ajustados, pese a que en el caso de los datos a un 10 % no parezca muy necesario. Esto se hará para estandarizar el procedimiento y comparar los resultados correctamente.

Las tendencias de los datos ajustados suelen disminuir respecto a los que no están ajustados, esto se debe a que los datos ajustados tienen en cuenta la medida de masa inicial tomada experimentalmente, esto genera una desviación entre los datos sin ajustar y los ajustados. Cabe destacar que el uso de esta medida de masa inicial se lleva a cabo para corregir las medidas iniciales de masa de cada ensayo, puesto que debido al movimiento del tejido ensayado en la cámara pueden dar medidas de masa negativa al afectar a la báscula de alta precisión. Las medidas

negativas se corrigen con el tratamiento de datos, evitando masas negativas. Por todo esto se generan variaciones en los datos que afectan a la tendencia después del ajuste.

6.2.2 Comparación Velocidades

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos, comparando la acción del factor de la velocidad en el viento. Para ello primero se mostrará una comparación de ensayos a diferentes velocidades del mes de Noviembre, donde se podrá comprobar la evolución de la pérdida de masa por superficie respecto del tiempo. Posteriormente se representarán los datos de tasas de evaporación de los ensayos con las aguas salobres en tablas, donde se podrá observar como la tendencia en la tasa de evaporación cambia en los diferentes meses según se varia la velocidad del viento.

En la Figura 24 se puede observar como el aumento de la potencia del ventilador genera un aumento en la tasa de evaporación. Esto se debe a que el aire arrastra las moléculas que se evaporan, evitando que estas se acumulen en la superficie del tejido creando una capa de aire húmedo o de aire saturado de vapor de agua. Esta capa genera una disminución del gradiente de moléculas de agua hacia la fase gaseosa pudiendo generar un equilibrio dinámico donde las moléculas vuelven del estado gaseoso al líquido, este equilibrio se disiparía lentamente por el gradiente de transferencia de masa hacia las diferentes capas de aire de menor humedad que se sitúan más alejadas del tejido. El viento actúa como mecanismo de barrido de estas capas homogeneizando la humedad del aire. Destacar que se puede conocer cuando el tejido se evapora por completo observando las zonas planas del grafico.

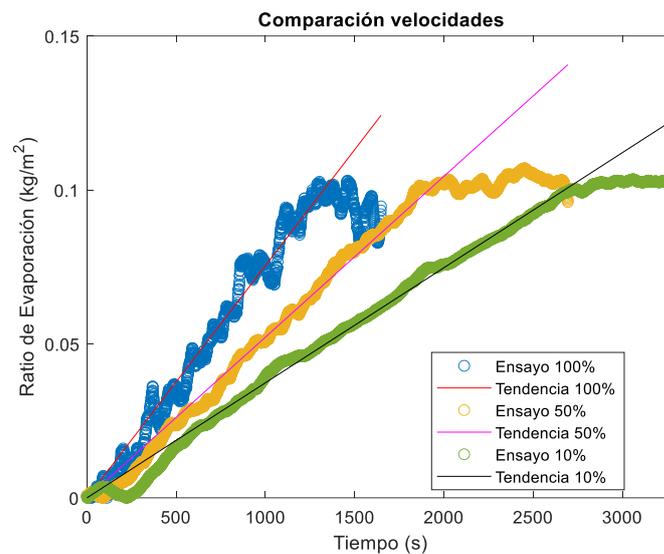


Figura 24: Comparación de velocidades del mes de Noviembre.

A continuación, se muestran los dos gráficos de barras con las tasas de evaporación de los diferentes ensayos con las aguas salobres.

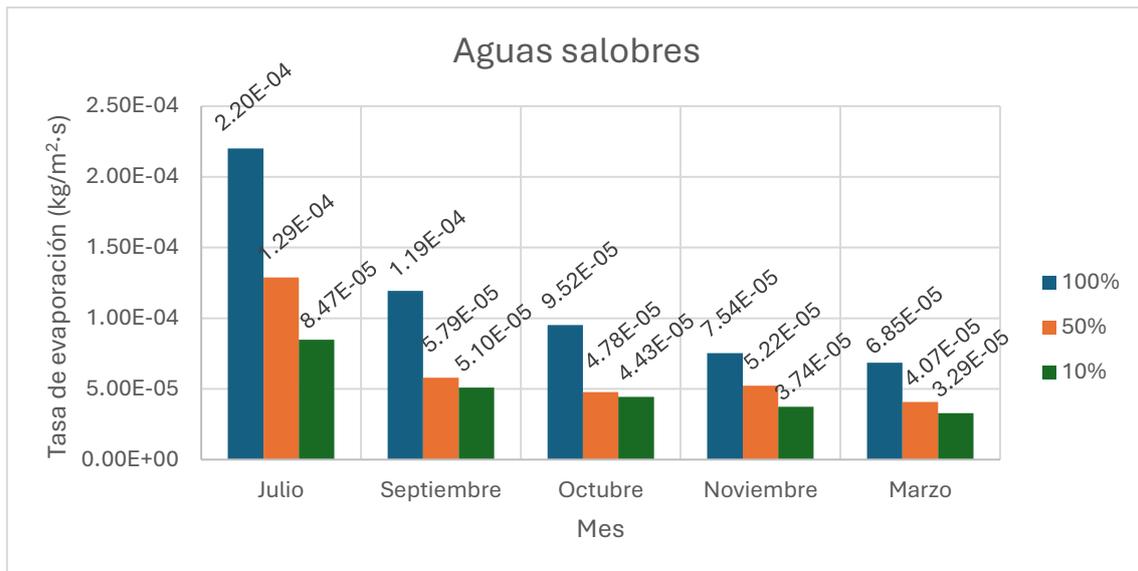


Figura 25: Comparación de las tasas de evaporación según las velocidades de viento por meses de aguas salobres.

En la Figura 25 se pueden observar todas las tasas de evaporación de cada uno de los ensayos realizados con las aguas salobres. Se puede apreciar claramente como al disminuir la velocidad del viento disminuye la tasa de evaporación. También cabe destacar que los meses de verano con condiciones de temperatura mayores y humedades relativas menores presentan tasas de evaporación notoriamente más elevadas.

6.2.3 Comparación Temperaturas

Los resultados que se compararán en este apartado persiguen el objetivo de mostrar la diferencia en la tasa de evaporación debido a la variable de la temperatura para ello se compararán los resultados de los meses de Octubre respecto a Marzo y los de Septiembre respecto a Noviembre. Esta decisión se debe a que presentan valores similares de humedad relativa y hay ensayos a mismas velocidades del viento.

Destacar que la humedad relativa no se mantiene constante en los ensayos con diferentes temperaturas, pero si es lo significativamente similar como para poder sacar conclusiones respecto a la importancia de la temperatura en procesos de evaporación.

A continuación, primero mostrara un ejemplo de la comparación de un ensayo y posteriormente se recopilarán todos los datos en una gráfica donde se hará un análisis de los resultados.

En la Figura 26 se muestra la comparación de temperatura de los meses de Octubre y Marzo a 100 % de velocidad de viento, esta diferencia de temperatura es de 17,7 °C a 11,4 °C respectivamente. Esta diferencia de 6,3 °C genera una diferencia en la tasa de evaporación notable.

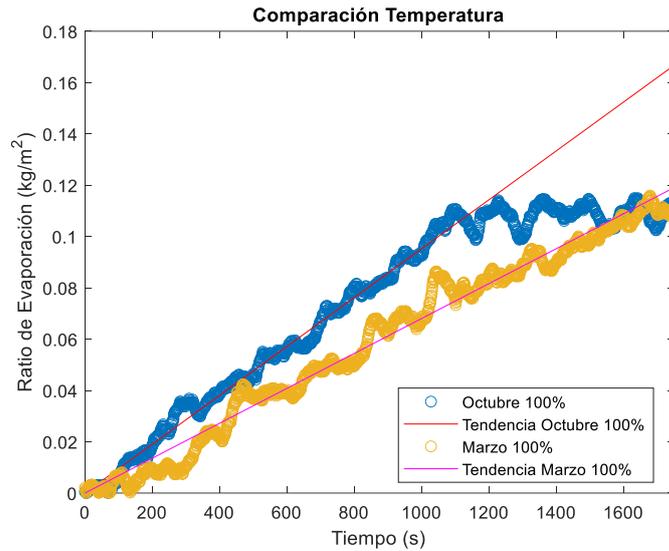


Figura 26: Comparación de temperaturas entre Octubre y Marzo a 100 % de velocidad de viento.

En la Figura 27 se muestra un gráfico de barras donde se presentan todas las tasas de evaporación de Octubre y de Marzo, en color naranja y azul están los ensayos de aguas salobres y en morado y verde los ensayos de las aguas sintéticas. Aquí se puede comprobar que los ensayos de Octubre presentan mayores tasas de evaporación para todos los casos, donde la única diferencia es la temperatura.

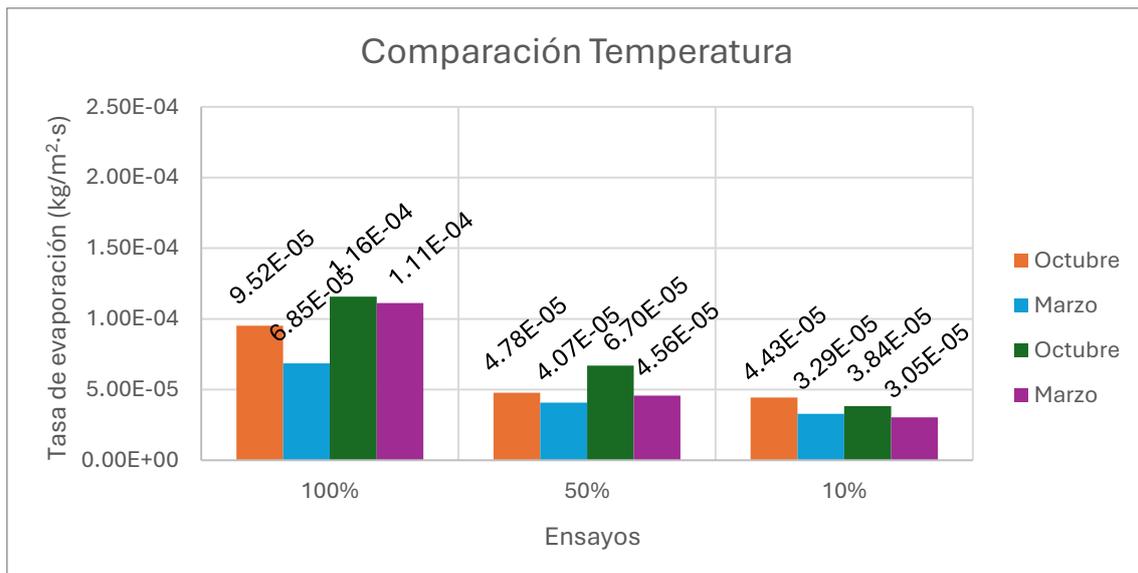


Figura 27: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Octubre y Marzo.3

En la Figura 28 se muestra la comparación de temperatura de los meses de Septiembre y Noviembre a 100 % de velocidad de viento, esta diferencia de temperatura es de 22 °C a 11,7 °C respectivamente. Esta diferencia de 10,3 °C se puede apreciar en la tendencia de las tasas de evaporación de ambos ensayos.

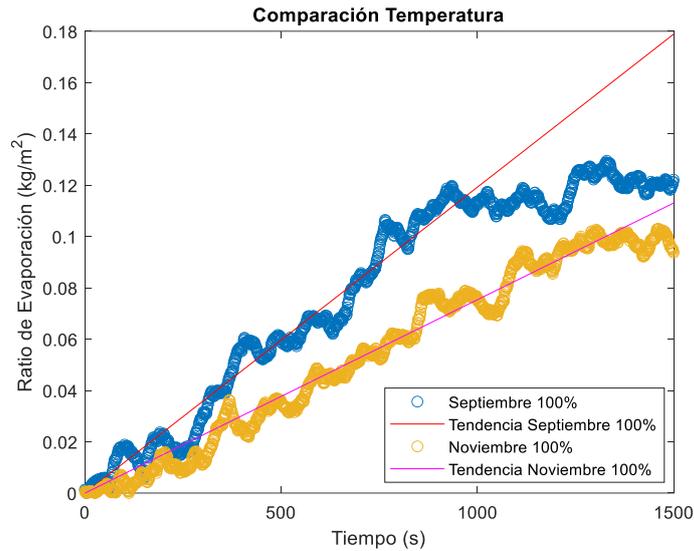


Figura 28: Comparación de temperaturas entre Septiembre y Noviembre a 100 % de velocidad de viento.

En la Figura 29 se puede observar la diferencia en las tasas de evaporación de los ensayos realizados en los meses de Septiembre y Noviembre, donde el color naranja y el azul hacen referencia a los ensayos con aguas salobres, mientras que el color verde y morado a los ensayos con aguas sintéticas. En este gráfico de barras se puede observar como las tasas de evaporación son mayores en los ensayos de Septiembre, esto se debe a la diferencia de temperaturas. Por otro lado, en este gráfico también se puede comparar la diferencia entre aguas salobres y sintéticas, donde claramente las aguas sintéticas presentan tasas de evaporación mayores, a excepción de los ensayos a 10 % de velocidad que apenas se aprecia diferencia.

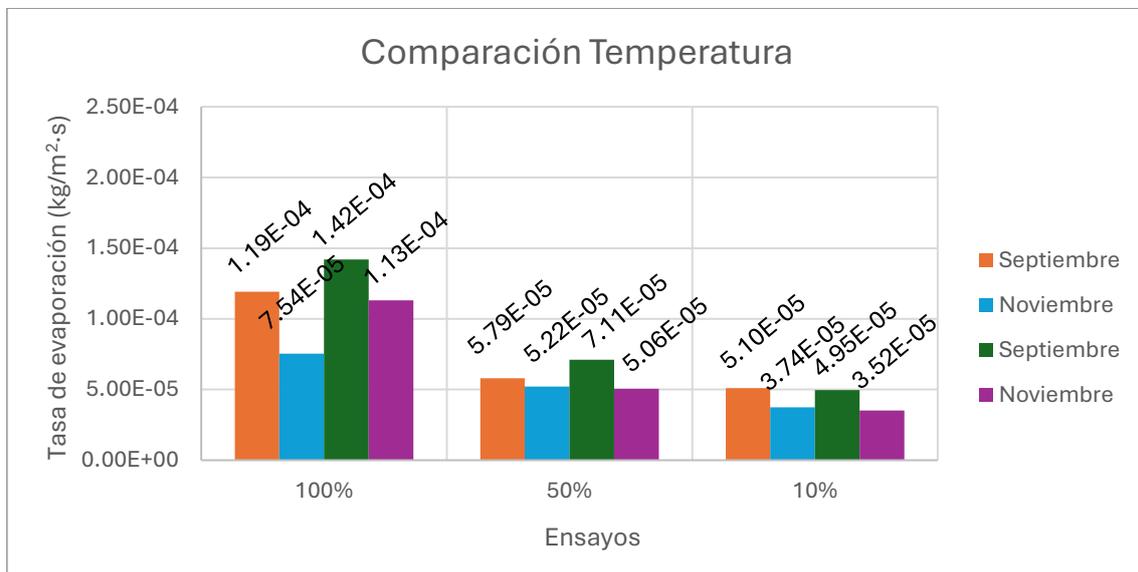


Figura 29: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Septiembre y Noviembre.

De todo esto, se puede sacar en claro que la temperatura afecta a la tasa de evaporación, esto se debe a factores relacionados a la energía cinética de las moléculas de agua y a la dinámica del proceso de evaporación.

La temperatura en el agua es el promedio de la energía cinética de las moléculas presentes, cuando una de las moléculas presentes obtiene la energía suficiente para romper las fuerzas de atracción intermoleculares se dice que se evapora. Otro parámetro importante relacionado con la cinética

es la velocidad de las colisiones, puesto que a mayor temperatura las moléculas chocan más veces y con mayor velocidad, por esto la probabilidad de que las moléculas adquieran la energía suficiente como para superar las fuerzas intermoleculares y pasar de fase líquida a fase gaseosa. Otros factores pueden ser la tensión superficial, esta mientras se eleva la temperatura pierde fuerza, facilitando la evaporación de las moléculas. Además de la presión de vapor, esta aumenta conforme aumenta la temperatura, por lo que si la fase líquida está en equilibrio con la fase gaseosa, pero sucede un cambio en la temperatura este equilibrio se desplazará.

6.2.4 Comparación Humedades

Los resultados que se compararán en este apartado, donde la acción del factor de la humedad relativa es el objetivo a analizar para conocer cómo afecta a la tasa de evaporación. Para ello, se compararán los resultados de los meses de Noviembre respecto a Marzo. Esto se mostrará con una gráfica de ejemplo de dos ensayos con las mismas condiciones de los meses anteriormente mencionados, además se presentará un gráfico de barras con todos los ensayos de Noviembre y Marzo.

Destacar que de igual manera que no se mantiene la humedad relativa en las comparaciones de temperatura con la temperatura pasa lo mismo para las comparaciones de diferentes humedades relativas. De igual manera se podrán sacar conclusiones de la importancia de la humedad relativa en un proceso de evaporación.

En la Figura 30 se muestra la comparación de humedad relativa de los meses de Noviembre y Marzo a 50 % de velocidad de viento, esta diferencia de humedad relativa es de 62,5 % a 67,5 % respectivamente. Esta diferencia de un 5 % se puede apreciar en la tendencia de las tasas de evaporación de ambos ensayos.

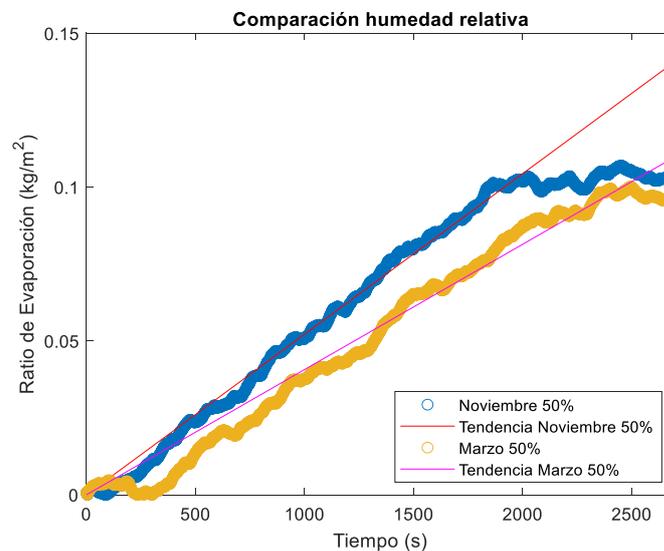


Figura 30: Comparación de humedades relativas entre Noviembre y Marzo a 50 % de velocidad de viento.

En la Figura 31 se puede observar la diferencia en las tasas de evaporación de los ensayos realizados en los meses de Noviembre y Marzo, donde el color naranja y el azul hacen referencia a los ensayos con aguas salobres, mientras que el color verde y morado a los ensayos con aguas sintéticas. En este gráfico de barras se puede observar como las tasas de evaporación son mayores en los ensayos de una humedad relativa inferior, es decir, los ensayos de noviembre. También se puede observar que las aguas sintéticas presentan una mayor tasa de vaporación, sobre todo en los ensayos al 100 % de velocidad del viento, en los ensayos de menor velocidad del viento no se aprecia este cambio en las tasas de evaporación debido a la salinidad de las aguas, posteriormente

en el apartado *Comparación de aguas* se desglosara de mejor manera la diferencia de tasas de evaporación respecto de la salinidad de las aguas.

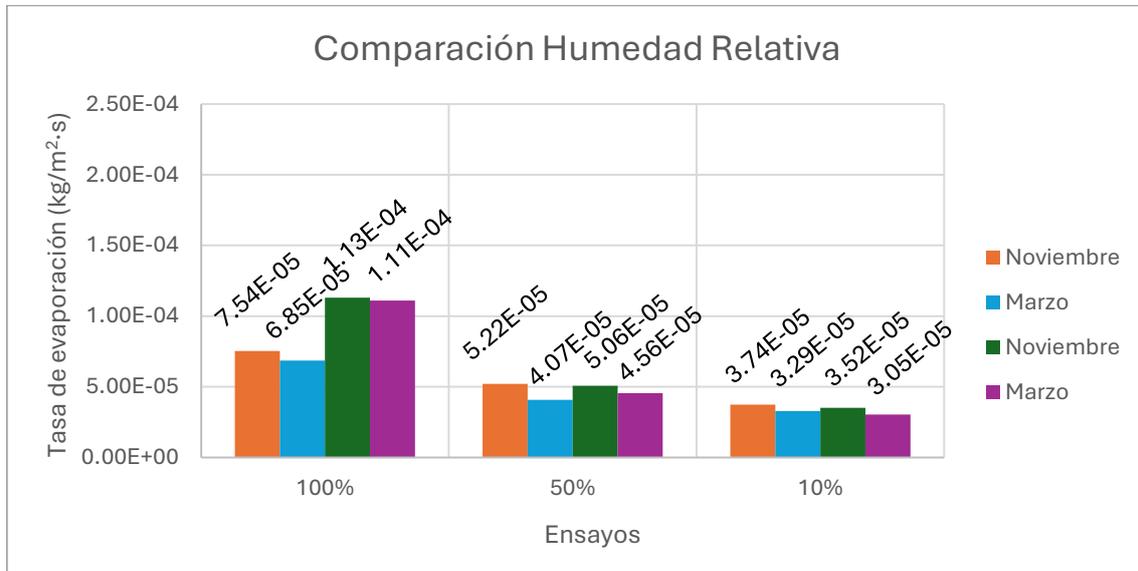


Figura 31: Comparación de tasas de evaporación para los meses de Noviembre y Marzo.

De todo esto, se puede sacar en claro que la humedad relativa afecta a la tasa de evaporación, esto se debe a factores relacionados al gradiente de concentración, la saturación del aire y a la dinámica del proceso de evaporación.

La humedad relativa es el porcentaje de agua que se encuentra en el aire en forma de vapor en función toda el agua que puede llegar a contener ese aire en forma de vapor de agua. La humedad relativa es inversamente proporcional a la tasa de evaporación, esto lo que quiere decir es que mientras menor humedad relativa mayor tasa de evaporación. Esto se explica gracias al gradiente de concentración que mientras más baja sea la humedad relativa en mayor grado se favorece la evaporación. Otro factor importante es el equilibrio dinámico que existe entre el agua en fase líquida que se evapora y el agua en fase gaseosa que se condensa, disminuir la humedad relativa hará que sea más fácil evaporar agua, puesto que se tiende a un equilibrio entre los procesos de evaporación y condensación.

6.2.5 Comparación de aguas

En este apartado se mostrarán las tasas de evaporación de cada ensayo resumidas en tablas de las aguas sintéticas y de las aguas salobres.

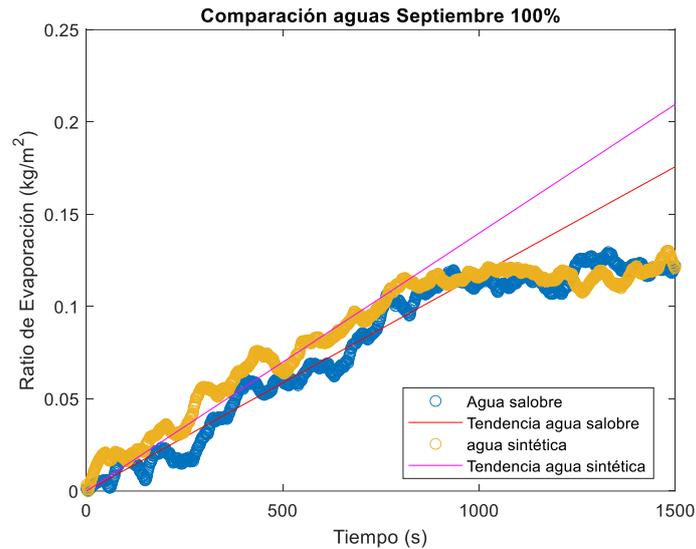


Figura 32: Comparación de aguas mes de Septiembre 100 % de velocidad de viento.

En la Figura 32 se muestra la comparación de aguas en el mes de Septiembre a 100 % de velocidad de viento, la diferencia entre estas aguas es principalmente su salinidad, se puede observar más en profundidad las características de estas aguas en la Tabla 4 y la Tabla 6. Esta diferencia en la salinidad se puede apreciar en la tendencia de las tasas de evaporación de ambos ensayos.

Se han comparado los resultados de las tasas de evaporación de los ensayos de las diferentes aguas, donde los ensayos de iguales condiciones se han comparado y se ha expresado la diferencia en porcentaje, posteriormente se han calculado los promedios para cada una de las velocidades.

En la Tabla 7 se puede observar que para los ensayos de 1 m/s el promedio de las diferencias entre las tasas de evaporación de las aguas es de un 16 %, pero teniendo en cuenta que para el mes de julio se presenta un dato que a la vista está que es erróneo se puede calcular un nuevo promedio sin este dato, siendo el resultado de un 26 % entre los ensayos con las diferentes aguas. También se pueden observar los ensayos con una velocidad de 0,53 m/s en los que hay datos muy variados, pero la media es de un 10 %, se puede observar que las aguas sintéticas siguen evaporando a mayor velocidad que las salobres, pero al disminuir la velocidad del viento la diferencia entre los ensayos también disminuye. Por últimos los ensayos a una velocidad de 0,22 m/s, donde el promedio de las tasas de evaporación es de un 4 % mayor en las aguas salobres. Esta diferencia es mínima, aquí afecta más el error humano o los errores debidos al ruido en los ensayos que la diferencia que se genera por la salinidad. A todo esto, se suma la comparación de las tasas del mes de octubre que presenta una mayor tasa el agua salobre, entorno al 15 %, siendo este un dato con un gran error.

Tabla 7: Comparación tasas de evaporación de las aguas.

Mes	Velocidad (m/s)	Aguas salobres Tasa de evaporación (kg/m ² ·s)	Aguas sintéticas Tasa de evaporación (kg/m ² ·s)	Diferencia de tasas
Julio	1	2,20·10 ⁻⁴	1,73·10 ⁻⁴	-27 %
Septiembre	1	1,19·10 ⁻⁴	1,42·10 ⁻⁴	16 %
Octubre	1	9,52·10 ⁻⁵	1,16·10 ⁻⁴	18 %
Noviembre	1	7,54·10 ⁻⁵	1,13·10 ⁻⁴	33 %
Marzo	1	6,85·10 ⁻⁵	1,11·10 ⁻⁴	38 %
Julio	0,53	1,29·10 ⁻⁵	1,21·10 ⁻⁴	-6 %
Septiembre	0,53	5,79·10 ⁻⁵	7,11·10 ⁻⁵	19 %
Octubre	0,53	4,78·10 ⁻⁵	6,70·10 ⁻⁵	29 %
Noviembre	0,53	5,22·10 ⁻⁵	5,06·10 ⁻⁵	-3 %
Marzo	0,53	4,07·10 ⁻⁵	4,56·10 ⁻⁵	11 %
Julio	0,22	8,47·10 ⁻⁵	9,55·10 ⁻⁵	11 %
Septiembre	0,22	5,10·10 ⁻⁵	4,95·10 ⁻⁵	-3 %
Octubre	0,22	4,43·10 ⁻⁵	3,84·10 ⁻⁵	-15 %
Noviembre	0,22	3,74·10 ⁻⁵	3,52·10 ⁻⁵	-6 %
Marzo	0,22	3,29·10 ⁻⁵	3,05·10 ⁻⁵	-8 %

De todo esto, se puede sacar en claro que tipo de agua afecta a la tasa de evaporación, esto se debe a factores relacionados al gradiente de concentración, la actividad del agua y al punto de evaporación.

El punto de evaporación del agua puede variar en función de la cantidad de especies disueltas, esto se debe a que la energía necesaria para que las moléculas adquieran cierta energía cinética es mayor puesto que el agua se agrupa en función de los iones disueltos, generando esferas de hidratación que intervienen en el proceso. Al existir mayor número de estas esferas la actividad del agua disminuye y las moléculas de agua se evaporan en menor medida, por esto el aumento de la salinidad afecta a la tasa de evaporación. Añadido a esto la presión de vapor cambia por el aumento de la salinidad por el mismo motivo. Por todo esto es que el gradiente de concentración de vapor de agua entre la superficie del agua y el aire se reduce.

6.3 Cálculo de constantes

En este apartado se pretende ajustar las constantes de la ecuación, para ello se usarán el conjunto de datos de tasas de evaporación de los ensayos del apartado de *Determinación de presiones de vapor para las aguas salobres*. Estos ensayos se realizan con el objetivo de calcular las constantes de Antoine, para ello se ha de colocar agua salobre de diferentes molaridades en el interior del reactor encamisado y hacer pasar por la camisa un fluido a diferentes temperaturas, todo esto mientras se mide la humedad relativa del agua salobre que se encuentra en el núcleo.

Las constantes mencionadas aparecen en la Tabla 1 y su se usan en la (Ec. 4) y en la (Ec. 5). Ensayos en cámara y los valores de las diferencias de presión de vapor calculadas con las temperaturas promedio de los ensayos. Pudiendo así generar una pendiente para las diferentes velocidades ensayadas con la que posteriormente se calcularan las constantes de velocidad.

6.3.1 Cálculo de pendientes

Ahora bien, al comparar las tasas de evaporación de cada ensayo con las mismas velocidades de viento en función de la diferencia de presión de vapor se puede observar una correlación lineal en los datos de estos ensayos.

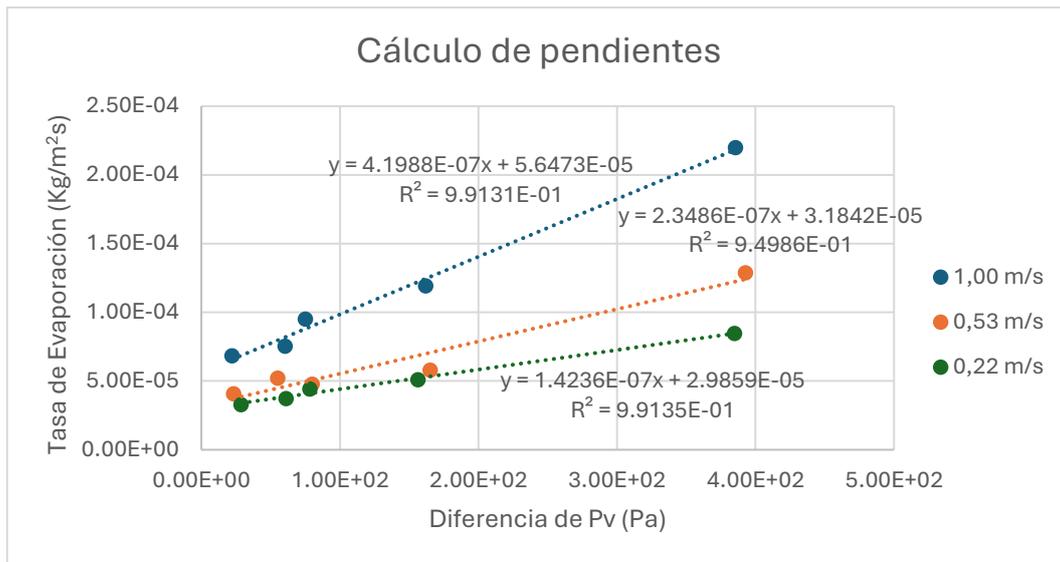


Figura 33: Cálculo de pendientes.

Por un lado, las pendientes de las rectas de ajuste de cada velocidad permiten ajustar un parámetro variable respecto a la velocidad del viento esto es la constante de la velocidad del viento, K_1 . Por otro lado, las ordenadas en el origen de las rectas de ajuste de cada velocidad permiten ajustar un parámetro variable respecto a la velocidad del viento este es la segunda constante de la velocidad del viento, K_2 . Cabe destacar que como se observa en la Figura 33 los coeficientes de determinación de los ajustes lineales de 1 m/s y 0,22 m/s son de 0,991 en ambos casos este valor es relativamente alto, pero el ajuste de la velocidad de 0,53 m/s posee un coeficiente de determinación de 0,950, este valor es ciertamente bajo, esto se puede deber a algún error durante los ensayos.

6.3.2 K_1

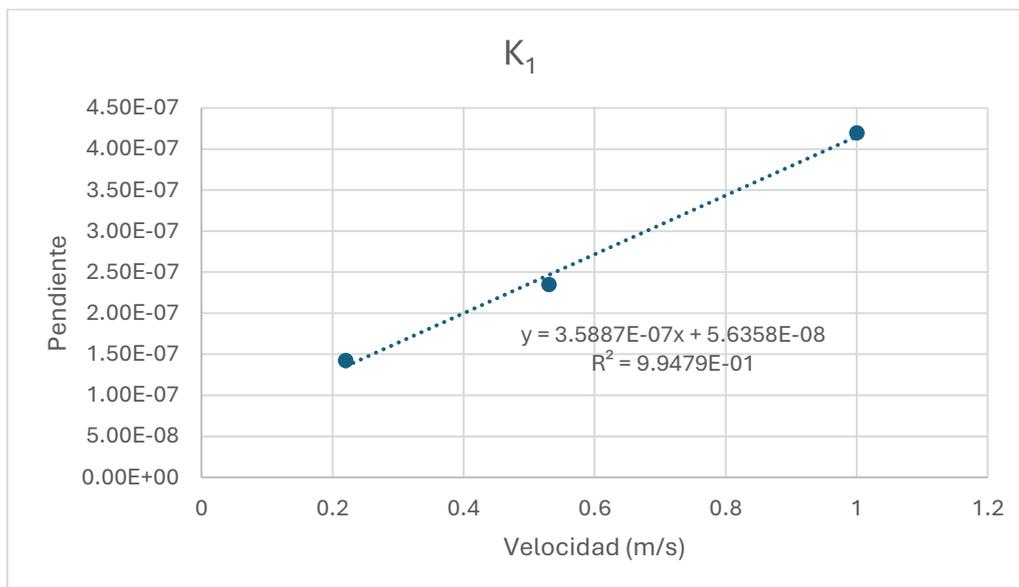


Figura 34: Pendientes respecto a velocidades del viento.

Esta constante de la velocidad del viento permite el cálculo de para cada velocidad del viento de la tasa de evaporación según la diferencia de presiones. Esta ecuación se calculó con la pendiente entre las velocidades y las pendientes de la Figura 34. El coeficiente de determinación es de 0,995 un valor adecuado para una recta de ajuste. La ecuación es la siguiente:

$$K_1 = 3,5873 \cdot 10^{-7} \cdot v + 5,7037 \cdot 10^{-8} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde v es la velocidad del viento en m/s.

6.3.3 K_2

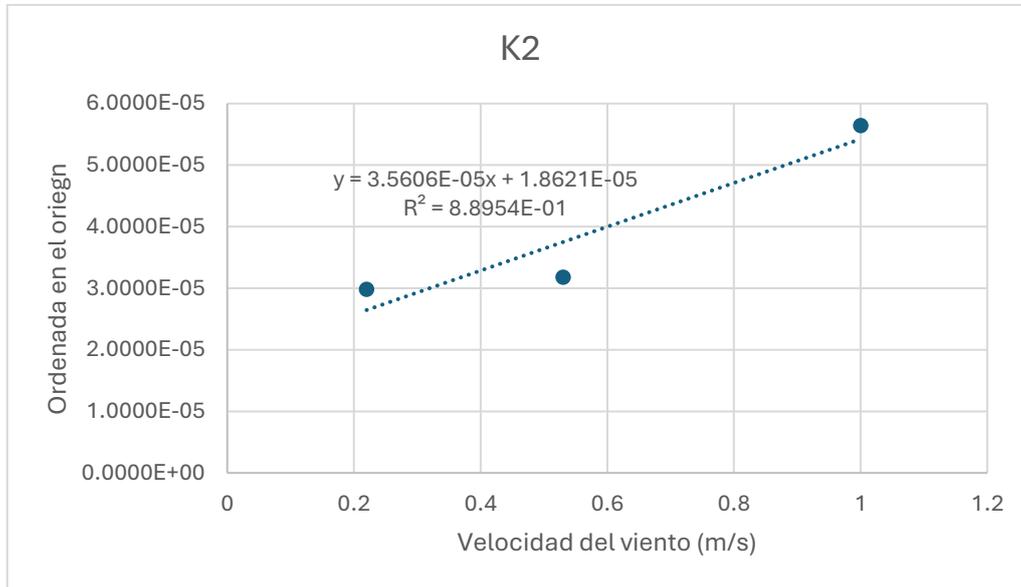


Figura 35: Ordenada en el origen respecto a velocidad del viento.

Esta constante representa la acción del viento independientemente de temperaturas y humedades, por ende, también de presiones de vapor. Para ello se hizo un ajuste con los valores de tasas de evaporación para una diferencia de presión de vapor nula de la Figura 35. El coeficiente de determinación es de 0,890 un valor poco adecuado para una recta de ajuste. La ecuación es la siguiente:

$$K_2 = 3,5606 \cdot 10^{-5} \cdot v + 1,8646 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Ec. 10})$$

donde v es la velocidad del viento en m/s.

6.4 Validación del modelo

Para el desarrollo de este modelo se usaron la mayoría de los datos de los ensayos realizados, para lograr un mejor ajuste de este. Por ello se realizaron nuevos ensayos con diferentes condiciones para ver cómo se ajusta el modelo en estas nuevas condiciones.

6.4.1 Nuevos ensayos

Los nuevos ensayos presentan las siguientes condiciones:

- Temperatura de 15 °C, humedad relativa de 65 % y velocidad del viento de 0,78 m/s o potencia del ventilador de 80 %.
- Temperatura de 20 °C, humedad relativa de 55 % y velocidad del viento de 0,61 m/s o potencia del ventilador de 60 %.
- Temperatura de 24 °C, humedad relativa de 50 % y velocidad del viento de 0,35 m/s o potencia del ventilador de 30 %.

Con los datos de estos ensayos se podrá definir la capacidad de predicción de las tasas de evaporación del modelo desarrollado y en función de los resultados concluir si el modelo es apto.

6.4.2 Ensayos de validación del modelo matemático

En este apartado se muestran las tasas de evaporación obtenidas como resultado de los ensayos y se comparan con las que se obtienen mediante el cálculo teórico del modelo matemático.

Tabla 8: Comparación tasas de evaporación de ensayos respecto las del modelo.

Tasa de evaporación ensayos (kg/m ² ·s)	Tasa de evaporación modelo (kg/m ² ·s)	Error
7,97·10 ⁻⁵	7,19·10 ⁻⁵	10 %
1,09·10 ⁻⁴	9,88·10 ⁻⁵	9 %
8,66·10 ⁻⁵	9,22·10 ⁻⁵	6 %

Como se puede observar en la Tabla 8 el modelo matemático predice las tasas de evaporación con un error promedio de un 8 %, teniendo en cuenta que los modelos admiten errores de hasta un 20 % se puede considerar un buen resultado. Este error se puede deber a múltiples motivos. Destacar que en la Figura 33 la recta de ajuste de los datos de 0,53 m/s de velocidad del viento tiene un coeficiente de determinación inferior si se compara con el resto de las velocidades, entorno al 0,950. Esto causa que en el cálculo de la constante K_2 en la Figura 35 se aprecie el segundo punto muy desplazado, con un coeficiente de determinación de 0,890 en el cálculo de la K_2 , mientras que la K_1 en la Figura 34 presenta un coeficiente de determinación 0,995.

Destacar que como resultado el modelo matemático predice el funcionamiento de la evaporación natural con gran exactitud. Aunque cuenta con el inconveniente de que la cámara climática solo era capaz de aportar velocidades de viento de 1 m/s, mientras que las velocidades del viento promedias en Cocentaina rondan valores muy elevados como se observa en la Tabla 2. Por lo que no se puede asegurar que un modelo matemático calculado a partir de ensayos con velocidades del viento mayores pueda dar mejores resultados

6.5 Ensayo de evaporación natural

A continuación, se muestran a forma de grafica los datos tomados de manera experimental de la pérdida de masa de los vasos, representando los datos en función de la temperatura y con una posterior normalización en función de la superficie se puede calcular la tasa de evaporación.

En la Figura 36 se pueden observar los datos experimentales para los tres vasos de mayor superficie, donde cada uno mediante un ajuste lineal se ha calculado su masa de agua evaporada por día. Se puede observar unos coeficientes de determinación elevados con valores de 0,999 para los tres vasos. Esto nos indica un buen ajuste.

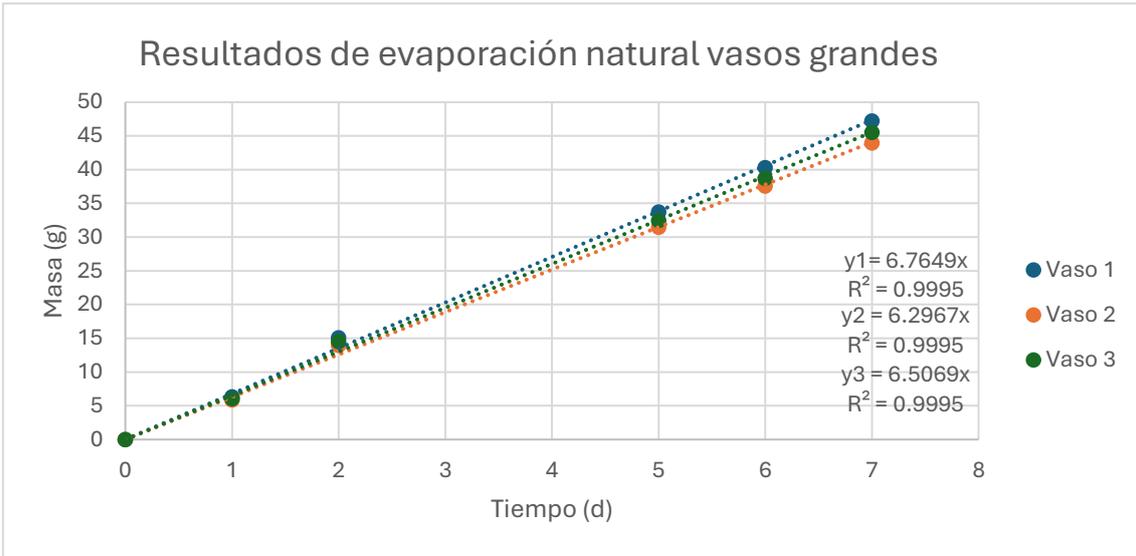


Figura 36: Resultados del ensayo de evaporación en los vasos grandes.

En la Figura 37 se pueden observar los datos experimentales para los tres vasos de menor superficie, donde igual que en el caso anterior cada uno mediante un ajuste lineal se ha calculado su masa de agua evaporada por día. Se puede observar que para estos tres vasos también poseen un buen ajuste con un coeficiente de determinación de 0,999.

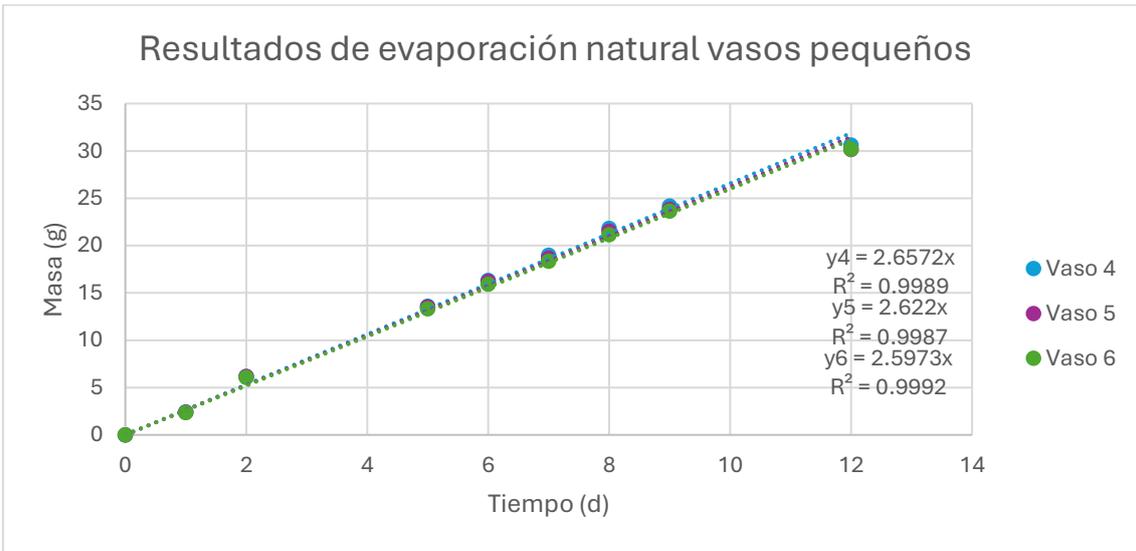


Figura 37: Resultados del ensayo de evaporación en los vasos pequeños.

Los resultados del ensayo de evaporación natural se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados ensayos de evaporación natural.

Vaso	Superficie (cm ²)	Masa evap (g/d)	Tasa evap (kg/m ² ·s)
1	32,03	6,75	$2,44 \cdot 10^{-5}$
2	30,43	6,30	$2,40 \cdot 10^{-5}$
3	32,09	6,51	$2,35 \cdot 10^{-5}$
4	8,11	2,66	$3,79 \cdot 10^{-5}$
5	8,08	2,62	$3,75 \cdot 10^{-5}$
6	8,14	2,60	$3,69 \cdot 10^{-5}$

Los resultados del ensayo de evaporación natural se muestran en la Tabla 9, donde se aprecian las medidas de superficie de cada vaso, las masas de evaporadas en función al tiempo calculadas mediante la pendiente de los gráficos donde se representa la masa evaporada de cada vaso, respecto al tiempo y las tasas de evaporación normalizadas en función de la superficie de cada vaso. Destacar que estos resultados servirán para el cálculo del agua evaporada desde la superficie del embalse.



Figura 38: Residuo de salmuera en los vasos de los ensayos de evaporación natural.

En la Figura 38 se pueden observar el resultado de los ensayos cuando se evapora toda el agua salobre dejando residuos de sales y materia orgánica principalmente. En la Figura 39 se puede observar que los residuos presentan pequeños cristales translucidos de sales y en los bordes del vaso se aprecian manchas más oscuras generadas por la materia orgánica.



Figura 39: Cristales presentes en el residuo de salmuera.

7 Diseño del sistema de evaporación natural

En este apartado se pretende mostrar las decisiones tomadas para el diseño de un sistema de evaporación natural empleando tejidos de bambú. Para el desarrollo de este se partieron de las tasas de evaporación calculadas con el modelo matemático para las peores condiciones de los datos del apartado *Datos climáticos*. Con esta tasa de evaporación se relacionarán los caudales a tratar con la superficie de tejidos necesaria y las dimensiones del embalse en función de la superficie necesaria para la disposición de los tejidos, para hacer el escalado a nivel industrial. Se continuo con el diseño de cada una de las partes de este sistema.

7.1 Dimensionamiento del sistema de evaporación

En el dimensionamiento del sistema de evaporación se plantearán las ecuaciones necesarias para conocer la masa evaporada en relación a las posibles superficies del embalse y la superficie necesaria de los tejidos para evaporar los posibles caudales. Conocer estos parámetros es imprescindible para realizar el posterior diseño.

7.1.1 Dimensionamiento del embalse

Teniendo en cuenta la evaporación promedio de los ensayos de evaporación natural como el dato de la evaporación de la superficie del embalse se puede generar un conjunto de posibles tamaños del embalse. Para ello se calcula la masa evaporada en cada superficie de los diferentes tamaños de embalse propuestos usando la tasa de evaporación de $3,070 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ resultado promedio de las tasas de evaporación de los ensayos del apartado de *Ensayo de evaporación natural*. Para las superficies se han generado diversos valores. La ecuación que explica este cálculo es la siguiente:

$$\text{Masa evaporada} = \text{Superficie} \cdot \text{Tasa evap} \quad (\text{Ec. 11})$$

Los datos obtenidos se expresan en la Figura 40 donde se puede observar el agua que se evapora desde la lámina de superficie del agua del embalse.

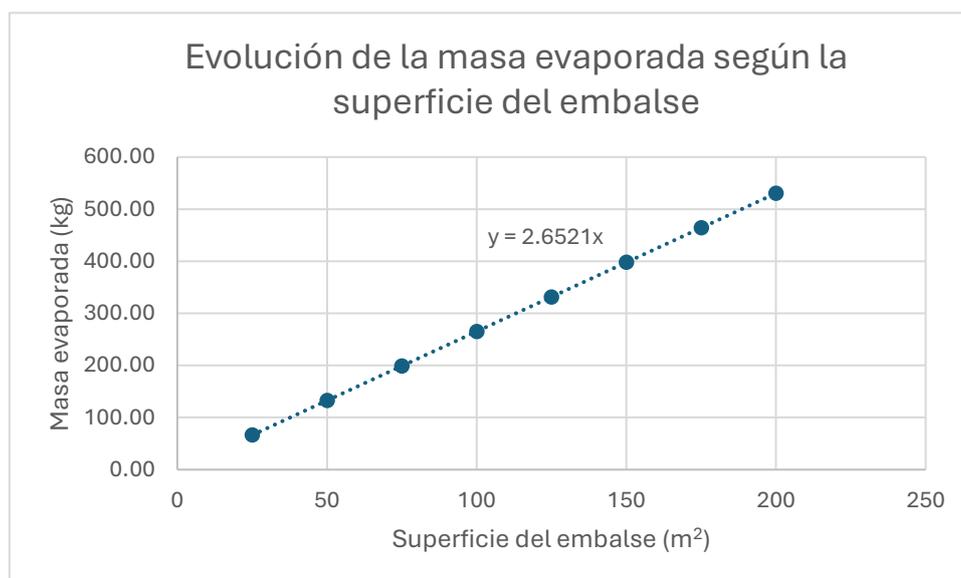


Figura 40: Evolución de la masa evaporada según la superficie del embalse.

7.1.2 Dimensionamiento de los tejidos

Teniendo en cuenta el dato de tasa de evaporación de las peores condiciones de los meses presentes en la Tabla 2, es de $1,944 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ se calculan las superficies de tejido necesarias para evaporar diferentes caudales propuestos. Estos caudales representan el rechazo de un proceso de ósmosis inversa, este proceso está en funcionamiento durante 18 h al día, además la densidad del agua salobre es de $997,87 \text{ kg/m}^3$, presente en la Tabla 1. Para este cálculo se usó la siguiente ecuación:

$$\text{Superficie} = \frac{Q \cdot t_{fun} \cdot \rho}{\text{Tasa evap}} \quad (\text{Ec. 12})$$

donde t_{fun} es el tiempo que la empresa tiene en funcionamiento el proceso de ósmosis inversa en h y Q es el posible caudal suministrado por la empresa en m^3/h .

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 41, donde se puede observar las diferentes superficies de tejido necesarias para tratar los caudales propuestos. Esto permite conocer de un simple vistazo la cantidad de tejidos necesarios, logrando saber que caudales podrán ser tratados en la planta a diseñar. Destacar que diseños para caudales superiores a $1 \text{ m}^3/\text{h}$ se escapa de las capacidades de la mayoría de los proyectos, puesto que requiere de grandes extensiones para su desarrollo o de diseños de alta complejidad.

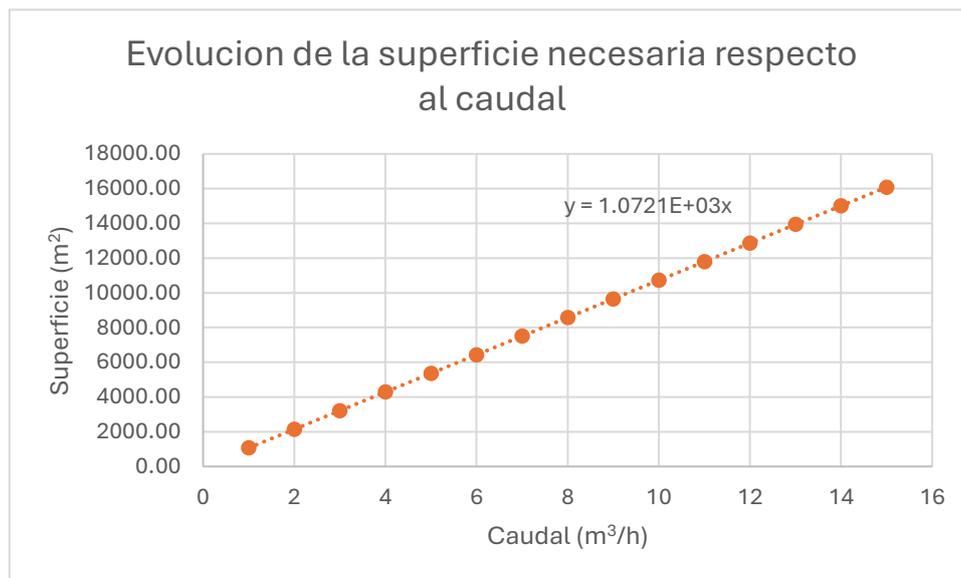


Figura 41: Evolución de la superficie necesaria respecto al caudal.

7.2 Diseño del proceso de evaporación

Anteriormente se han realizado ciertos cálculos necesarios para en diseño, pero es ahora cuando se presentarán los diseños de las diferentes partes del proceso, entre ellas están el embalse, los tejidos, el tanque de homogenización y el sistema hidráulico.

Para el diseño de los tejidos se ha estandarizado una mediada de $2 \times 1 \text{ m}^2$ de superficie. Estos tejidos son de bambú se pueden comprar con relativa facilidad, aunque otra opción es producirlos por el proceso descrito en el apartado de *Proceso de extracción del bambú*.

Para el embalse se han tomado unas medidas de $10 \times 10 \times 2,5 \text{ m}^3$, con un volumen de 250 m^3 . La altura del embalse se tiene en cuenta los márgenes necesarios para que el tejido se pueda sumergir de manera completa más ciertos márgenes de seguridad. En cuanto a la superficie del embalse se

han tomado estas medidas para obtener un volumen considerable y con un orden de magnitud típico del sector empresarial.

En cuanto al número de tejidos a usar se calculó la mejor disposición posible en el embalse de 10 x 10 m² de superficie, logrando usar 392 unidades de tejido para dicho embalse, lo que proporciona un caudal de evaporación de 0,55 m³/h en el caso de las peores condiciones, siendo estas de una humedad relativa del 74,8 %, de una temperatura de 9,56 °C y de una velocidad del viento de 4,36 m/s.

Para la disposición de los tejidos se agruparon en 8 columnas de 49 filas, la separación entre las columnas es de 0,1 m y 0,25 m con las paredes del embalse, mientras que la separación entre las filas es de 0,1 m y 0,15 m con las paredes del embalse. Los tejidos se agrupan en columnas, estos se suspenden de dos vigas transversales para cada columna de tejidos que cruzan el embalse, estas vigas suben y bajan para sumergir los tejidos mediante un sistema hidráulico.

Para el diseño del sistema hidráulico se tiene en cuenta la fuerza máxima que ha de realizar cuando eleva los tejidos, esta se calcula teniendo en cuenta el peso de las dos vigas, los 49 tejidos y el agua absorbida por cada una de las ocho secciones.

Sistema hidráulico consta de la bomba hidráulica y del pistón, con la bomba sabremos la presión y con el pistón la sección, para así poder conocer el límite máximo de carga admisible del sistema hidráulico. Las cargas de los tejidos húmedos se calcularon con las medidas de masa inicial de los tejidos, para ello se calculó el peso en función de la superficie y después se extrapolo a la cantidad total de tejido del diseño. Los tejidos ensayados pesan de media 0,4813 gramos para 30 cm² de tejido y para el agua absorbida la media de los ensayos es de 0,3149 gramos para 30 cm² de tejido. Con todo esto podemos calcular los pesos por superficie y multiplicando por la superficie total obtenemos un valor máximo de carga de 208 kg sumado al peso de los materiales de construcción empleados para las vigas que es de 560 kg, lo que nos da un valor total de 770 kg. Sera necesaria la selección de un sistema hidráulico que pueda soportar estas cargas.

Para el diseño del tanque de homogenización es necesario calcular el volumen de este tanque. Para ello se tomó la decisión de calcular el sumatorio de todas las diferencias de caudales en un día entre el de llegada al sistema de evaporación desde la empresa y el caudal de evaporación del sistema en las peores condiciones. De esta manera se puede depositar la diferencia del caudal en este tanque para evitar el desbordamiento del embalse. Cabe destacar que el volumen que final será el calculado más un coeficiente de seguridad, para evitar un posible fallo que origine el desbordamiento del embalse.

Un caudal de la empresa de 0,73 m³/h durante 18 horas equivale al caudal de evaporación con las peores condiciones de Cocentaina funcionando 24 horas, siendo este de 0,55 m³/h. Estos son los datos necesarios para el cálculo del volumen del tanque de homogenización como se muestra a continuación:

$$V_{teo} = (Q_e - Q_s) \cdot t_{fun} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$V_{real} = V_{teo} \cdot \text{Coeficiente de seguridad} \quad (\text{Ec. 14})$$

donde Q_e es el caudal de la empresa en m³/h, Q_s es el caudal del sistema de evaporación en m³/h, t_{fun} es el tiempo de suministro por parte de la empresa en h, V_{teo} es el volumen teórico del tanque de homogenización en m³ y V_{real} es el volumen real del tanque de homogenización en m³.

El resultado obtenido es de 3,32 m³ para el volumen teórico y de 3,69 m³ para el volumen real, siendo el coeficiente de seguridad de un 11 %. En el Anexo de Planos se encuentran los planos de cada una de las partes del diseño.

Por último, destacar que el proceso progresivamente concentra las aguas hasta el punto de saturación. Esto lo que quiere decir es que se debe detener el proceso en el momento en el que la concentración del embalse sea la de saturación. Este volumen de agua saturada será un residuo necesario de tratar que supondrá un coste añadido, ya que se contratará a una empresa externa para que se encargue. El punto de saturación de sales como el cloruro de sodio (NaCl), el sulfato de magnesio (MgSO₄) y el nitrato de potasio (KNO₃) son valores entre 360 y 70 g/L, por lo que se han de concentrar hasta reducir su volumen por debajo del 1 %. Destacar que la diferencia entre llegar a estas concentraciones y una evaporación completa dejando solo el residuo sólido no representa una gran diferencia como coste de residuos, pero sí en costes de mantenimiento para la limpieza del embalse. Además, de que el diseño del proceso aumentaría drásticamente su complejidad, para evitar la sedimentación de sales que impidan el correcto sumergimiento de los tejidos. Por todo esto el diseño se realizó teniendo como objetivo concentrar las aguas hasta un punto de saturación.

8 Estudio económico

Se realizará un estudio económico detallado sobre los costes de instalación, costes de mantenimiento y se estudiará el coste que este supone respecto al caudal tratado. Además, se realizará un análisis de viabilidad económica del sistema de evaporación natural empleando tejidos de bambú para el tratamiento de aguas salobres.

8.1 Costes de instalación

Para el desarrollo del presupuesto sobre los equipos a instalar para el funcionamiento de la planta se ha utilizado el programa CYPE (CYPE Ingenieros, S.A), con el objetivo de conocer la inversión inicial para un proyecto de estas características. Este programa desarrolla un software técnico ampliamente utilizado en el ámbito de la arquitectura, ingeniería y construcción para el análisis de los costes referentes a materiales, mano de obra y costes directos complementarios. En este estudio se ha usado dicha herramienta para conocer el orden de magnitud de las diferentes partes del diseño, logrando así obtener un coste aproximado de instalación para un proyecto de las magnitudes del descrito en el apartado de *Diseño del proceso de evaporación*. Aunque no todas las piezas descritas en el proceso se encontraban en el programa CYPE, la información de algunas se ha obtenido de búsquedas en los típicos portales de compra y venta.

A continuación, se segmenta el análisis de costes de instalación en las diferentes partes del diseño. Aunque al final se reagrupan para obtener un resultado.

8.1.1 Material para el embalse

Para el diseño del embalse se propusieron unas dimensiones de 10 x 10 x 2,5 m³, atendiendo a estas dimensiones los muros han de tener un lado de 10 x 2,6 m² para evitar desbordamientos, además de un espesor de 0,15 m. Conociendo estas dimensiones se puede calcular el volumen de cada pared y posteriormente conocer cuanto hormigón se desea comprar, teniendo en cuenta que el cálculo del volumen es para una de las cuatro paredes. Además, se supone un trabajo a realizar por los operarios para la construcción del embalse, para el oficial de 5 h y de 20 h para el ayudante. Toda esta información queda desglosada en la Tabla 10.

Tabla 10: Desglose de costes del embalse.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Hormigón HA-35/F/20/XC2, fabricado en central, con aditivo hidrófugo.	m ³	15,6	106,75	1665,30
Mano de obra. Oficial 1 ^a estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	h	5	23,03	115,15
Mano de obra. Ayudante estructurista, en trabajos de puesta en obra del hormigón.	h	20	21,86	437,20
Costes directos complementarios	%	2	115,15	2,30
			Coste total (€)	2219,95

8.1.2 Material para los tejidos

En el diseño del sistema de evaporación se calculó un total de 784 m² de tejidos, pero a la hora del montaje es necesaria una cantidad mayor de tejido para el ensamblaje, por ello se propone una compra de 900 m² de tejido. Además, se plantean unas 100 h para el corte de todos los tejidos y montaje junto a los marcos. Toda esta información queda desglosada en la Tabla 11.

Tabla 11: Desglose de costes de los tejidos.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Tejido de bambú, de 1 x 1 m ² de longitud y 4 mm de espesor.	m ²	900	15,51	13959,00
Materiales. Sellado de juntas mediante la aplicación con pistola de silicona sintética incolora.	m	2352	0,85	1999,20
Materiales. Material auxiliar para la colocación de tejidos.	Ud	392	1,26	493,92
Mano de obra. Oficial 1 ^a carpintero.	h	3	23,55	70,65
Mano de obra. Ayudante carpintero.	h	100	22,35	2235,00
Costes directos complementarios.	%	2	16890,87	337,82
			Coste total (€)	19095,59

Para el montaje de los 392 tejidos cada uno de 2 x 1 m² se calcularon un total de metros de marcos igual a 2352 m, aunque se compraron 2400 m por posibles problemas en el montaje de ellos. Además, se plantean 100 h de trabajo para la preparación del marco, soldando las esquinas de estos. Toda esta información queda desglosada en la Tabla 12.

Tabla 12: Desglose de costes de los marcos.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Perfil en L, para la sujeción de tejidos, de acero inoxidable AISI 304, con alas de 28 x 12 mm ² de longitud y 3 mm de espesor.	m	2400	5,78	13872,00
Mano de obra. Oficial 1 ^a soldador.	h	100	22,13	2213,00
Costes directos complementarios.	%	2	13872,00	277,44
			Coste total (€)	16362,44

8.1.3 Material para la estructura

Durante el diseño se propuso una estructura donde colgar los tejidos para poder sumergirlos, esta estructura consta de 16 vigas paralelas, dos para cada columna de tejidos de 10 m y dos extras perpendiculares que unan la estructura de 10 m también cuatro más para que soporten la estructura a 3 m desde el suelo cuando se sumergen los tejidos. Esto da como resultado 190 m de vigas de una sección de 50 x 30 mm², conociendo el volumen y densidad de acero a comprar se calcularon 565,20 kg de material, se presupuestaron 580 kg para evitar problemas. Además, supusieron 8 h de trabajo para el montaje. Toda esta información queda desglosada en la Tabla 13.

Tabla 13: Desglose de costes de las vigas.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Material. Acero S275J0H en perfiles huecos conformados en frío, piezas simples, para aplicaciones estructurales, de la serie rectangular, acabado con imprimación antioxidante. Trabajado y montado en taller, para colocar con uniones soldadas en obra.	Kg	580	1,59	922,20
Equipo y maquinaria. Equipo y elementos auxiliares para soldadura eléctrica.	h	8	3,42	27,36
Mano de obra. Oficial 1ª montador de estructura metálica.	h	8	23,03	184,24
Mano de obra. Ayudante montador de estructura metálica.	h	8	21,86	174,88
Costes directos complementarios.	%	2	184,24	3,68
			Coste total (€)	1312,36

8.1.4 Sistema Hidráulico

Para el sistema hidráulico se encontró una bomba de doble acción, capaz de subir y bajar la estructura con todos los tejidos húmedos y un pistón de 2 m de recorrido, capaz de sacar los tejidos del embalse por completo. Se adquieren 2 unidades de bomba y pistón, una para cada lado del embalse. En menos de una hora se puede realizar la instalación necesaria. Toda esta información queda desglosada en la Tabla 14.

Tabla 14: Desglose de costes del sistema hidráulico.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Bomba Hidráulica de Acción Doble Remolque Volquete 12 V Depósito Metálico de 4 L	Ud	2	216,99	433,98
Materiales. Cilindro hidráulico Cilindro de ariete hidráulico de carrera de 2" de diámetro 36" Cilindros hidráulicos de 3000 psi Tubo transversal de doble acción soldado Cilindro de elevación	Ud	2	158,99	317,98
Mano de Obra. Oficial 1ª fontanero.	h	0,9	22,74	20,47
Mano de Obra. Ayudante fontanero.	h	0,9	20,98	18,88
Costes directos complementarios.	%	2	198,30	3,97
			Coste total (€)	795,28

8.1.5 Tanque de homogenización

En el diseño del tanque de homogeneización se desarrollan todos los cálculos respecto al volumen necesario. En el CYPE entre los posibles tanques de homogenización se seleccionó el de mayor volumen, 3700 L. El resto de información es recomendada en el propio CYPE y queda desglosada en la Tabla 15, son las piezas necesarias y tiempos de los operarios para desarrollar la instalación.

Tabla 15: Desglose de costes del tanque de homogenización.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Válvula de esfera de latón niquelado para roscar de 1".	Ud	1	12,15	12,15
Materiales. Válvula de compuerta de latón fundido, para roscar, de 1".	Ud	2	9,14	18,28
Materiales. Válvula de flotador de 1" de diámetro, para una presión máxima de 6 bar, con cuerpo de latón, boya esférica roscada de latón y obturador de goma.	Ud	1	67,95	67,95
Materiales. Depósito de poliéster reforzado con fibra de vidrio, cilíndrico, de 3700 l, con tapa, aireador y rebosadero, para colocar en superficie.	Ud	1	1100,00	1100,00
Materiales. Interruptor de nivel de 10 A, con boya, contrapeso y cable.	Ud	2	15,00	30,00
Materiales. Material auxiliar para instalaciones de fontanería.	Ud	1	1,40	1,40
Mano de obra. Oficial 1ª fontanero.	h	2,43	22,74	55,26
Mano de obra. Ayudante fontanero.	h	2,43	20,98	50,98
Mano de obra. Oficial 1ª electricista.	h	0,25	22,74	5,69
Costes directos complementarios.	%	2	118,93	2,38
Coste total (€)				1344,09

También se añadieron tuberías, para las conexiones entre el tanque de homogenización y el embalse, teniendo en cuenta el paso intermedio por la bomba o grupo de presión. Además, de algunos metros en caso de que fueran necesario desde el punto de suministro del caudal de alimentación al tanque de homogenización. Toda la información al respecto de las tuberías queda desglosada en la Tabla 16.

Tabla 16: Desglose de costes de las tuberías.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas de color azul, de 50 mm de diámetro exterior y 3 mm de espesor, SDR17, PN=10 atm, según UNE-EN 12201-2, con el precio incrementado el 30% en concepto de accesorios y piezas especiales.	m	50	3,60	180,00
Mano de obra. Oficial 1ª fontanero.	h	4	22,74	90,96
Mano de obra. Ayudante fontanero.	h	4	20,98	83,92
Costes directos complementarios.	%	2	90,96	1,82
Coste total (€)				356,70

Por último, el grupo de presión anteriormente mencionado, de seleccionó un equipo con la suficiente capacidad para mover el caudal necesario y con la capacidad de resistir aguas salobres. Toda la información al respecto de las tuberías queda desglosada en la Tabla 17.

Tabla 17: Desglose de costes del grupo de presión de agua.

Sección y descripción	Unidad	Cantidad	Coste unitario (€)	Coste total (€)
Materiales. Grupo de presión de agua, modelo AP MATRIX 5-4-1 VV "EBARA".	Ud	1	4140,00	4140,00
Materiales. Juego de 4 amortiguadores antivibración para la bancada del grupo de presión, "EBARA".	Ud	1	80,00	80,00
Materiales. Material auxiliar para instalaciones de fontanería.	Ud	1	1,40	1,40
Materiales. Puesta en marcha de grupo de presión con una bomba con variador de frecuencia, "EBARA".	Ud	1	234,00	234,00
Mano de obra. Oficial 1ª fontanero.	h	4,58	22,74	104,04
Mano de obra. Ayudante fontanero.	h	2,29	20,98	48,00
Costes directos complementarios	%	4	4244,04	169,76
			Coste total (€)	4777,20

El CYPE facilita información adicional sobre el grupo de presión de agua:

- El grupo de presión de agua está formado por: una bomba centrífuga multicelular horizontal MATRIX 5-4/0,9, con una potencia de 0,9 kW, cuerpo de impulsión, soporte, impulsor, camisa externa y eje de acero inoxidable AISI 304, rodamientos de bolas lubricados de por vida, cierre mecánico, motor asíncrono de 2 polos, eficiencia IE3, aislamiento clase F, protección IP55, para alimentación trifásica a 230/400 V, equipo de regulación y control con variador de frecuencia (presión constante), bancada metálica común para bomba y cuadro eléctrico, válvulas de corte, antirretorno y de aislamiento, manómetro, presostato, depósito de membrana, de chapa de acero de 50 l, cuadro eléctrico de fuerza y control para la operación totalmente automática del grupo, soporte metálico para cuadro eléctrico.

8.1.6 Costes de instalación totales

En este apartado se resumen todos los costes de instalación. Se muestran de manera organizada en la Tabla 18, mostrando también el precio final tras la aplicación del Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) que es de un 21 %.

Destacar que no se facilita información sobre la adquisición de un terreno o recinto, debido a que el diseño de este sistema de evaporación natural se usa como tratamiento de aguas salobre de un proceso anterior. Por tanto, lo lógico es dejar en manos de la empresa la distribución de los equipos y la zona de montaje.

Tabla 18: Recopilación de los costes de instalación.

Sección	Coste sin IVA (€)	Coste con IVA (€)
Material	39556,12	47862,91
Mano de obra de oficiales	2859,46	3459,95
Mano de obra de ayudantes	3048,86	3689,12
Costes directos complementarios	799,17	967,00
Coste total (€)	46263,61	55978,97

8.2 Estimación de costes anuales

Realizado el estudio de costes de instalación se prosigue con la estimación de costes anuales. Para el desarrollo de este apartado es necesario conocer los diferentes costes del proceso. Existe una metodología para este tipo de estudio, que consiste en la estimación mediante porcentajes de los costes de cada parte del proceso.

Esta metodología se basa en separar por costes variables y fijos, donde se necesitan conocer los que generan un mayor impacto económico, para calcular un coste total aproximado a partir de los porcentajes que la metodología asigna en promedio a dichos costes. Estos se extraen de estimaciones que calculan los promedios de diversos proyectos, esta no es la forma más precisa de calcular los costes anuales del proyecto, pero se asemeja en gran medida. Una vez calculado el total se puede aproximar el resto de los costes menores según los porcentajes anteriormente mencionados.

Para la estimación de costes anuales de este proyecto se ha seccionado en variables y fijos. Por un lado, los costes variables se dividen en energéticos del sistema hidráulico y del grupo de presión de agua, también en de gestión de residuos. Por otro lado, los costes fijos se han dividido en de termino de potencia eléctrica, de personal, de mantenimiento e indirectos.

Destacar que los costes con mayor impacto tomados como base para el cálculo del coste total son los costes variables energéticos. Estos se calcularon con las especificaciones de los equipos seleccionados en el presupuesto de instalación, siendo estos la bomba hidráulica presente en la Tabla 14 y la bomba centrífuga presente en la Tabla 17. Conociendo la potencia de los equipos, el precio de la energía y las horas de actividad anuales de cada equipo se calcularon los costes energéticos variables de estos equipos.

Posteriormente se calcularon el resto de los costes mediante los porcentajes asociados a ellos y con el coste total del proyecto calculado mediante los costes energéticos. Estos porcentajes se encuentran en un rango donde se asigna cada porcentaje según si para el proyecto en cuestión se considera de mayor o menor relevancia. A continuación, se justificarán los porcentajes asignados a cada sección de los costes.

Para los costes derivados de la gestión de residuos los porcentajes recomendados son un rango entre 2,5-5,5 %, para el diseño desarrollado se supone un coste de un 5 %, puesto que una vez concentradas las aguas se han de gestionar, además

Para los costes derivados del término de potencia los porcentajes recomendados son un rango entre 4-5 %, para el diseño desarrollado se supone un coste de un 4 %. Debido a que el proyecto tiene un gran gasto debido a costes energéticos, por lo que puede acceder a mejores condiciones en el término de potencia contratada.

Para los costes derivados del personal los porcentajes recomendados son un rango entre 5-9 %, para el diseño desarrollado se supone un coste de un 9 %. Aquí existen diversas posibles propuestas. Por un lado, la principal y seleccionada es que el personal de la empresa dedicado a otros departamentos pueda organizarse periódicamente para gestionar la subida/bajada de los tejidos y los caudales de entrada al embalse. Por otro lado, existe la posibilidad de que el proceso se gestione de manera autónoma, mediante el uso de sensores en el embalse que midan las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento para calcular la tasa de evaporación teórica para conocer los tiempos de evaporación de los tejidos, así pudiendo conocer cuando se deben sumergir.

Para los costes derivados del mantenimiento los porcentajes recomendados son un rango entre 6,5-12,5 %, para el diseño desarrollado se supone un coste de un 7 %. Este diseño no requiere un

gran mantenimiento, a excepción de posibles residuos de sales precipitadas en el fondo del embalse o en los tejidos, pese a que estos deban redisolverse al sumergir los tejidos.

Para los costes indirectos los porcentajes recomendados son un rango entre 7,5-18,5 %, para el diseño desarrollado se supone un coste de un 8 %. Esto se debe a que no se esperan otros costes añadidos que representen una carga para el gasto anual en el tratamiento de aguas salobres mediante este sistema de evaporación natural.

Por último, se muestra en la Tabla 19 un resumen con todos los costes expresados tanto en cantidad absoluta en un año como en relación al volumen tratado anualmente.

Tabla 19: Desglose de los costes anuales del proyecto.

Costes	Coste anual (€)	Coste por m ³ tratado (€/m ³)	Porcentaje de relevancia (%)
Variables			
Energía sistema hidráulico	5581,00	0,65	54
Energía grupo de presión	1255,72	0,15	13
Gestión de corrientes residuales	510,20	0,06	5
Fijos			
Termino de potencia	408,16	0,05	4
Personal	918,37	0,11	9
Mantenimiento	714,28	0,08	7
Costes indirectos	816,32	0,09	8
Totales	10204,06	1,19	100

Para el cálculo del volumen tratado anualmente se hizo uso del modelo desarrollado, facilitando los datos climáticos de la Tabla 2. Una vez conocida la tasa de evaporación de cada mes y la superficie del diseño se calcularon los volúmenes evaporados por mes por los tejidos y por la superficie del embalse. Por último, al dividir los costes entre el volumen es como conocemos la información presente en la Tabla 19.

8.3 Análisis de viabilidad

Una vez realizado un presupuesto de los costes de instalación y de los costes de mantenimiento del sistema de evaporación natural es necesario realizar un análisis de viabilidad económica, pudiendo así estudiar la rentabilidad económica del proyecto. Aunque este no genera ningún beneficio directo, no significa que no pueda ser económicamente rentable.

Ahora bien, en este apartado se recopilará toda la información necesaria para que las industrias posiblemente interesadas puedan conocer los costes que supone un proyecto de estas magnitudes. Así pudiendo compararlo con los costes gestión de residuos de aguas salobres. Destacar que cada empresa deberá comprobar diversos factores para corroborar la viabilidad de un sistema de estas características en su proceso. Tener en cuenta detalles como que este diseño puede tratar un volumen anual de 8600 m³ de agua salobre con una superficie de tejido de 784 m² y un embalse de 10 x 10 m² para las condiciones de Cocentaina. También que el coste de inversión es de unos 55978,97 € y el coste por m³ de 1,19 €.

Otras posibles modificaciones para el sistema son sistematizar el proceso para evitar el coste derivado de los empleados. Una pérgola retráctil para añadir el factor de la evaporación por vía solar cuando las condiciones lo favorezcan. Además de un embalse secundario al que desviar el

agua concentrada y poder seguir evaporando hasta descarga cero de líquido (ZLD), para una posible venta posterior de alguna sal con una demanda relevante que pueda hacer este sobrecosto rentable.

9 Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se ha logrado desarrollar un diseño de un sistema de evaporación natural asistida por aire para el tratamiento de aguas salobres. A lo largo del desarrollo de este trabajo de fin de grado se han conseguido también cumplir con otros objetivos.

Con un estudio de recopilación de datos sobre las condiciones climáticas de Cocentaina sobre las variables de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. Todo para conocer las condiciones típicas de cada mes, pudiendo así realizar ensayos en cámara con los que poder conocer cómo y en qué medida afectan los diversos factores ambientales anteriormente mencionados.

En el caso de la temperatura se pueden comparar ensayos donde la única variable es la temperatura, dando como resultado que cuando se varía la temperatura de 11,4 °C a 17,7 °C se aprecia un aumento de la tasa de evaporación de 21 % y de 11,7 °C a 22 °C el aumento es del 25 %. En el caso de la humedad relativa se pueden comparar ensayos de 67,5 % a 62,5 % con un aumento de la tasa de evaporación del 11 %. En el caso de la velocidad del viento hay ensayos para comparar con variaciones de 0,22 m/s a 1 m/s, 0,53 m/s a 1 m/s y 0,22 m/s a 0,53 m/s, donde los aumentos de la tasa de evaporación son de 59 %, 45 % y 26 % respectivamente.

Cabe destacar que, con la información obtenida de estos ensayos mediante el uso de programas como Excel y Matlab, se ha logrado obtener tasas de evaporación experimentales con las que poder comprender en profundidad el funcionamiento de la evaporación.

Ahora bien, con el conocimiento desarrollado respecto a la evaporación se desarrolló un modelo matemático completamente funcional. Esto se pudo comprobar cuando el modelo logra predecir las tasas de evaporación con un error de un 8 %, teniendo en cuenta que los ensayos en cámara presentan una dispersión de medidas muy elevada.

Por un lado, se realizó un diseño, donde se plasmaron todos los conocimientos a nivel teórico y de laboratorio logrando el diseño de un proceso industrial donde se empleó para el supuesto un total de 784 m² de tejido de bambú en un embalse de 10 x 10 m² capaz de tratar 8600 m³ al año de aguas salobres generando un residuo del 1 % todo con materiales y energías con un mínimo impacto medioambiental.

Por otro lado, se hizo un estudio económico de este diseño, donde únicamente se recogen todos los costes de inversión para la instalación del sistema de evaporación natural con un valor de 55978,97 € y los costes anuales que ascienden a un valor de 10204,06 € o lo que es lo mismo 1,19 €/m³.

La conclusión global de este trabajo de final de grado es que añadir un proceso de evaporación natural para tratar las aguas salobres que se generan en ciertas industrias es poco costoso y positivo para el medioambiente. Un diseño de estas características es completamente viable, además de que se puede modificar ciertos factores en el diseño para adaptarlo a las circunstancias de cada empresa.

Como posibles futuras investigaciones en el campo de la evaporación natural empleando tejidos naturales para las aguas salobres se destacan a continuación varios puntos en los que se pueden centrar. Se pueden realizar ensayos con diversas sales y concentraciones, logrando así conocer más en profundidad el efecto de la salinidad en la evaporación. Se puede estudiar la actividad del sol en este tipo de sistemas para el aumento de las tasas de evaporación. Se pueden probar condiciones más extremas llevando este tipo de diseños a zonas más cercanas al ecuador del planeta donde las condiciones son más favorables. Se pueden realizar ensayos con una mayor diversidad de velocidades de viento, centrándose en valores más elevados, pudiendo así

desarrollar un modelo más completo, ya que la velocidad del viento que es el principal factor que afecta a la evaporación. Por último, también se pueden estudiar otros materiales sin perder de vista las ventajas que ofrece el bambú.

Para terminar, con el desarrollo de este trabajo de fin de grado se ha logrado alinear algunos de los ODS estipulados en la Agenda 2030, siendo éstos los ODS 5; Agua limpia y saneamiento, ODS 9; Industria, innovación e infraestructuras, ODS 11; Ciudades y comunidades sostenibles y ODS 15; Vida de ecosistemas terrestres.

10 Bibliografía

- [1]. Honarparvar, S., Zhang, X., Chen, T., Na, C., & Reible, D. (2019). Modeling technologies for desalination of brackish water — toward a sustainable water supply. In *Current Opinion in Chemical Engineering* (Vol. 26, pp. 104–111). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.005>
- [2]. *A/RES/71/313*.
- [3]. Valderrama, J. O., Espíndola, C., & Quezada, R. (2011). Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias. *Formación Universitaria*, 4(3), 3–12. <https://doi.org/10.4067/s0718-50062011000300002>
- [4]. Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). Our ecological footprint: reducing human impact on the earth (Vol. 9). New society publishers.
- [5]. Dey, S., & Islam, A. (2015). A Review on Textile Wastewater Characterization in Bangladesh. *Resources and Environment*, 5(1), 15–44. <https://doi.org/10.5923/j.re.20150501.03>
- [6]. Xu, D., Lee, L. Y., Lim, F. Y., Lyu, Z., Zhu, H., Ong, S. L., & Hu, J. (2020). Water treatment residual: A critical review of its applications on pollutant removal from stormwater runoff and future perspectives. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 259). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109649>
- [7]. Honarparvar, S., Zhang, X., Chen, T., Alborzi, A., Afroz, K., & Reible, D. (2021). Frontiers of membrane desalination processes for brackish water treatment: A review. In *Membranes* (Vol. 11, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes11040246>
- [8]. Flores-Prieto, J. J., Ramírez-Luna, J. J., Calderón-Mólgora, C. G., Delgado-Quezada, E., & Morales-García, A. J. (2015). Solar Brackish Water Treatment for Irrigation Using Low-Pressure Nanofiltration. *Water Technology and Sciences*, VI(6), 5–17.
- [9]. Islam, M. S., Sultana, A., Saadat, A. H. M., Islam, M. S., Shammi, M., & Uddin, M. K. (2018). Desalination Technologies for Developing Countries: A Review. *Journal of Scientific Research*, 10(1), 77–97. <https://doi.org/10.3329/jsr.v10i1.33179>
- [10]. Cheng, H. H., Narindri, B., Chu, H., & Whang, L. M. (2020). Recent advancement on biological technologies and strategies for resource recovery from swine wastewater. In *Bioresource Technology* (Vol. 303). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122861>
- [11]. <https://firessa.com/blog/filtracion/tipos-de-filtracion/nanofiltracion/>
- [12]. Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. *Water Research*, 75, 164–187. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2015.02.032>
- [13]. Wang, S., You, Y., Wang, X., Huang, W., Zheng, L., & Li, F. (2023). Fouling mechanism and effective cleaning strategies for vacuum membrane distillation in brackish water treatment. *Desalination*, 565. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116884>
- [14]. Tian, J., Zhao, X., Gao, S., Wang, X., & Zhang, R. (2021). Progress in research and application of nanofiltration (Nf) technology for brackish water treatment. In *Membranes* (Vol. 11, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/membranes11090662>
- [15]. Patel, S. K., Biesheuvel, P. M., & Elimelech, M. (2021). Energy Consumption of Brackish Water Desalination: Identifying the Sweet Spots for Electrodialysis and Reverse Osmosis. *ACS ES and T Engineering*, 1(5), 851–864. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.0c00192>
- [16]. Misra, U., Haque Barbhuiya, N., Hussain Rather, Z., & Singh, S. P. (2024). *Historical Perspective Solar interfacial evaporation devices for desalination and water treatment: Perspective and future*. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103154>
- [17]. Sharshir, S. W., Algazzar, A. M., Elmaadawy, K. A., Kandeal, A. W., Elkadeem, M. R., Arunkumar, T., Zang, J., & Yang, N. (2020). New hydrogel materials for improving solar water evaporation, desalination and wastewater treatment: A review. *Desalination*, 491, 114564. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2020.114564>

- [18]. Cui, L., Wang, P., Che, H., Chen, J., Liu, B., & Ao, Y. (2023). Solar-driven interfacial water evaporation for wastewater purification: Recent advances and challenges. *Chemical Engineering Journal*, 477, 147158. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2023.147158>
- [19]. Ahmed, M., Shayya, W. H., Hoey, D., Mahendran, A., Morris, R., & Al-Handaly, J. (2000). Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants. *Desalination*, 130(2), 155–168. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00083-7)
- [20]. Arnal, J. M., Sancho, M., Iborra, I., Gozávez, J. M., Santafé, A., & Lora, J. (2005). Concentration of brines from RO desalination plants by natural evaporation. *Desalination*, 182(1–3), 435–439. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.036>
- [21]. Chehayeb, K. M., Farhat, D. M., Nayar, K. G., & Lienhard, J. H. (2017). Optimal design and operation of electrodialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration. *Desalination*, 420, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.003>
- [22]. Khoshrou, I., Jafari Nasr, M. R., & Bakhtari, K. (2017). New opportunities in mass and energy consumption of the Multi-Stage Flash Distillation type of brackish water desalination process. *Solar Energy*, 153, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.021>
- [23]. Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery-Analysis, challenges and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104418>
- [24]. Macedonio, F., Katzir, L., Geisma, N., Simone, S., Drioli, E., & Gilron, J. (2011). *Wind-Aided Intensified eVaporation (WAIV) and Membrane Crystallizer (MCR) integrated brackish water desalination process: Advantages and drawbacks.* <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.002>
- [25]. Hubbe, M. A., & Koukoulas, A. A. (2016). Wet-laid nonwovens. In *BioResources* (Vol. 11, Issue 2)
- [26]. Kundu, C. K., Li, Z., Song, L., & Hu, Y. (2020). An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications. *European Polymer Journal*, 137, 109911. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2020.109911>
- [27]. López-Borrell, A., Lora-García, J., Fombuena, V., Cardona, S. C., & López-Pérez, M. F. (2024). Characterization of Natural and Synthetic Fabrics for the Treatment of Complex Wastes. *Polymers*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/polym16010084>
- [28]. Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. In *Journal of Materials Science* (Vol. 55, Issue 3, pp. 829–892). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- [29]. Radzi, A. M., Zaki, S. A., Hassan, M. Z., Ilyas, R. A., Jamaludin, K. R., Daud, M. Y. M., & Aziz, S. A. (2022). Bamboo-Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastic Polymer Composites: A Review of Properties, Fabrication, and Potential Applications. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14071387>
- [30]. Abdul Khalil, H. P. S., Bhat, I. U. H., Jawaid, M., Zaidon, A., Hermawan, D., & Hadi, Y. S. (2012). Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review. In *Materials and Design* (Vol. 42, pp. 353–368). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.015>
- [31]. Singh, V. P., & Xu, C. Y. (1997). Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, 11(3), 311–323. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19970315\)11:3<311::aid-hyp446>3.0.co;2-y](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19970315)11:3<311::aid-hyp446>3.0.co;2-y)
- [32]. Huang, J. (2018). A simple accurate formula for calculating saturation vapor pressure of water and ice. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(6), 1265–1272. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0334.1>

- [33]. Patil, K. R., Tripathi, A. D., Pathak, G., & Katti, S. S. (1981). Thermodynamic Properties of Aqueous Electrolyte Solutions². Vapor Pressure of Aqueous Solutions of NaBr. In *J. Chem. Eng. Data* (Vol. 36). <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [34]. Gilron, J., Ramon, E., Assaf, N., & Kedem, O. (2018). Wind-aided intensified evaporation (WAIV): An environmentally sustainable method for brine management. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Membrane Desalination Systems: The Next Generation* (pp. 215–241). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813551-8.00009-7>
- [35]. Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267–2269. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>
- [36]. Henrietta, Santoso, H., & Witono, J. R. (2020). Modelling of Saltwater Evaporation using WAIV. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 742(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/742/1/012013>
- [37]. *UNE-EN ISO 9073-6_2003 Absorción.*

11 Anexos

11.1 Comunicaciones científicas

Cabe destacar que este trabajo de fin de grado se desarrolló en el departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA), en este departamento se ha brindado la oportunidad de mostrar las investigaciones que se desarrollaron en el laboratorio para la realización de este trabajo en el XI Congreso I+D+I Campus d'Alcoi "Creando Sinergias", celebrado el días 4 de julio en Alcoy de 2024 con el título del trabajo "Sistema de evaporación natural empleando un tejido natural de bambú para el tratamiento de aguas salobres".

11.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

Tabla 20: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1; Fin de la pobreza				×
ODS 2; Hambre cero				×
ODS 3; Salud y bienestar				×
ODS 4; Educación de calidad				×
ODS 5; Igualdad de género				×
ODS 6; Agua limpia y saneamiento	×			
ODS 7; Energía asequible y no contaminante				×
ODS 8; Trabajo decente y crecimiento económico				×
ODS 9; Industria, innovación e infraestructuras	×			
ODS 10; Reducción de las desigualdades				×
ODS 11; Ciudades y comunidades sostenibles	×			
ODS 12; Producción y consumos responsables				×
ODS 13; Acción por el clima				×
ODS 14; Vida submarina				×
ODS 15; Vida de ecosistemas terrestres	×			
ODS 16; Paz, justicia e instituciones sólidas				×
ODS 17; Alianzas para lograr objetivos				×

De los objetivos que se expresan en la Agenda 2030 se pueden relacionar como alineados con el presente trabajo los ODS 6, 8, 9, 11, 13 y 15.

Los ODS del punto 6 hacen referencia al agua limpia y al saneamiento de estas. Los sistemas de evaporación natural se centran en el tratamiento del este recurso, por lo que el desarrollo de este proyecto está fuertemente relacionado con esta meta, más en concreto con la sección 6.3 que mediante el uso de estos sistemas se reduciría en grandes cantidades la emisión de productos químicos.

En cuanto a los ODS del punto 9, se basan en la creación de infraestructuras e industrias sostenibles e innovadoras. El diseño propuesto se basa en innovar en la forma de tratar los residuos de las aguas salobres, para que las industrias que producen estas aguas sean más sostenibles, ya que el proceso usa las condiciones climáticas para funcionar. Esto se relaciona directamente con las metas del punto 9.4 que aboga por reconvertir las industrias para que sean sostenibles, promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpios.

También cabe destacar los ODS 11, puesto que se centran en mejorar los asentamientos humanos logrando que sean más sostenibles entre otras características. Las aguas residuales son unos de los principales desechos de los asentamientos humanos, también muchos productos que se consumen en estas generan caudales de residuos que es necesario tratar. Aquí es donde un proceso de las características del desarrollado en este trabajo puede generar un impacto muy positivo, sobre todo en el punto 11.6 que se centra en reducir el impacto ambiental negativo de los asentamientos humanos.

Por último, el ODS número 15 pretende proteger los ecosistemas terrestres y las tierras para que estos sean más sostenibles. Uno de los problemas de una incorrecta gestión de los residuos salobre es la salinización de las tierras, por lo que una correcta gestión de estos residuos mediante la implantación del proyecto desarrollado en las industrias que generan aguas salobres puede evitar en gran medida este problema, cumpliendo con la meta 15.1 que se centra en conservar estos ecosistemas terrestres y terrenos buscando mejorar su sostenibilidad.

11.3 Planos

A continuación, se presentan los planos diseñados para la comprensión del diseño anteriormente descrito, donde se muestran los tejidos, el soporte de vigas y el embalse, con sus medidas expresadas en metros.

Para el caso de los tejidos estos aparecen de frente, de perfil y desde la vista inferior. Destacar, que las acotaciones están en metros y que los marcos aparecen ya montados. En el caso de las vigas se muestran desde la vista superior y de ambos perfiles. Las vigas están montadas de manera que cubren la parte superior del embalse, para poder sumergir los tejidos. Presentan una leve dificultad de apreciar la sección de las vigas, debido a la diferencia de dimensiones. Por último, el embalse se muestra desde la parte superior y uno de los perfiles, puesto que es idéntico visto desde cualquier perfil.

1

2

3

4

5

6

7

8

A

A

B

B

C

C

D

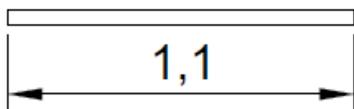
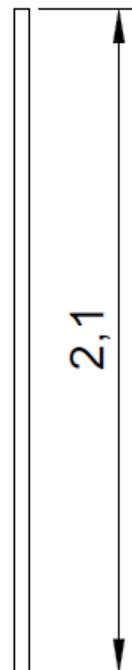
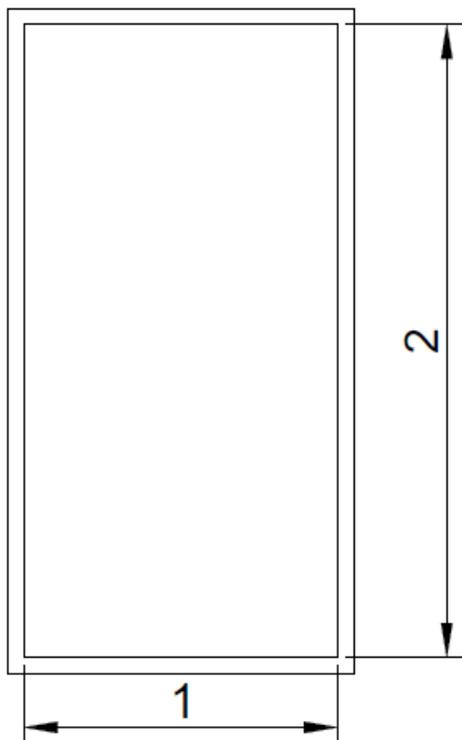
D

E

E

F

F



NOMBRE	FECHA	NUMERO DE PLANO	1
YOJAN	20/07/2024		
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI		TEJIDOS	

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

A

A

B

B

C

C

D

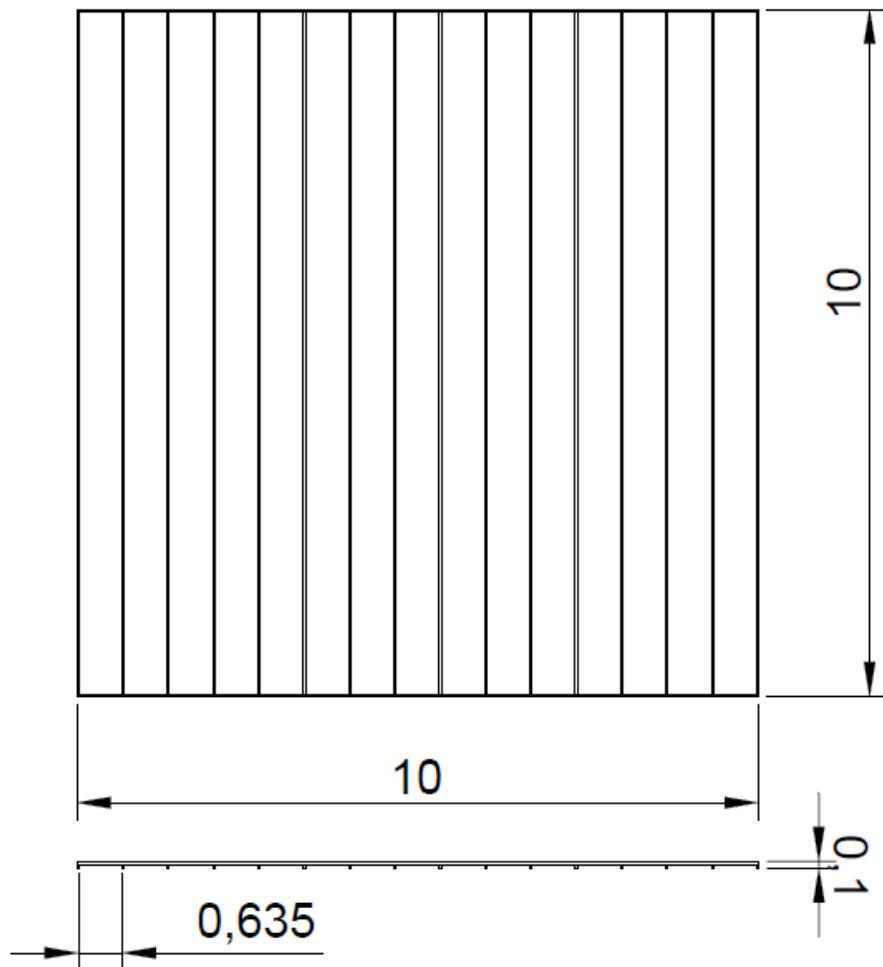
D

E

E

F

F



NOMBRE	FECHA	NUMERO DE PLANO	2
YOJAN	20/07/2024	VIGAS	
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI			

1

2

3

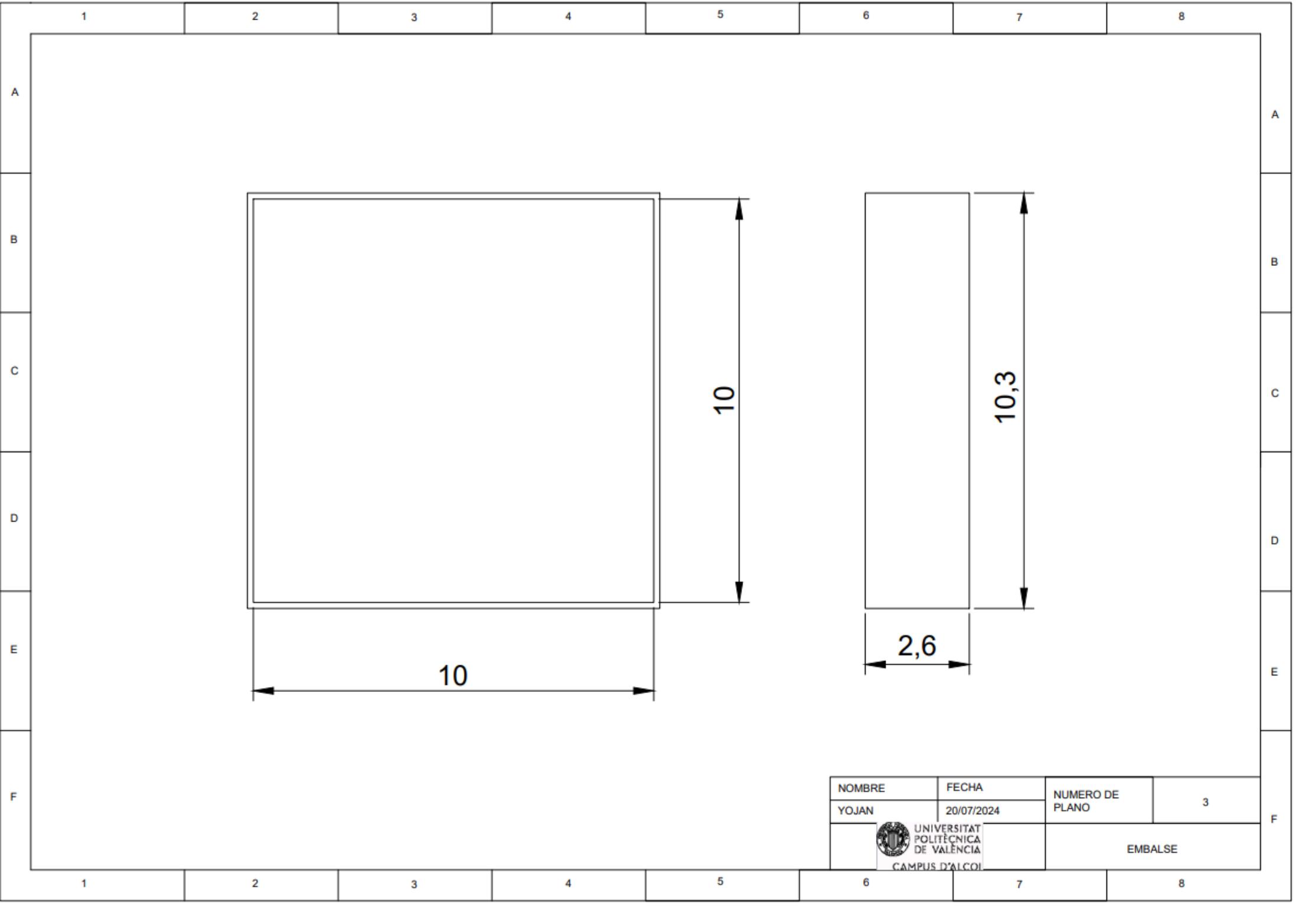
4

5

6

7

8



NOMBRE	FECHA	NUMERO DE PLANO	3
YOJAN	20/07/2024		
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI		EMBALSE	

11.4 Diagrama de flujo

En la Figura 42 se puede apreciar en la parte superior el diagrama de flujo del proceso. Este comienza por un tanque de homogeneización, ayudado de un grupo de presión para transportar el agua salobre en dirección al embalse, donde el agua se evapora por acción de las condiciones climáticas, mediante los tejidos dispuestos en la estructura de vigas, la cual es elevada por los dos sistemas hidráulicos dispuestos en los laterales del embalse. En la parte inferior de la imagen aparece la leyenda.

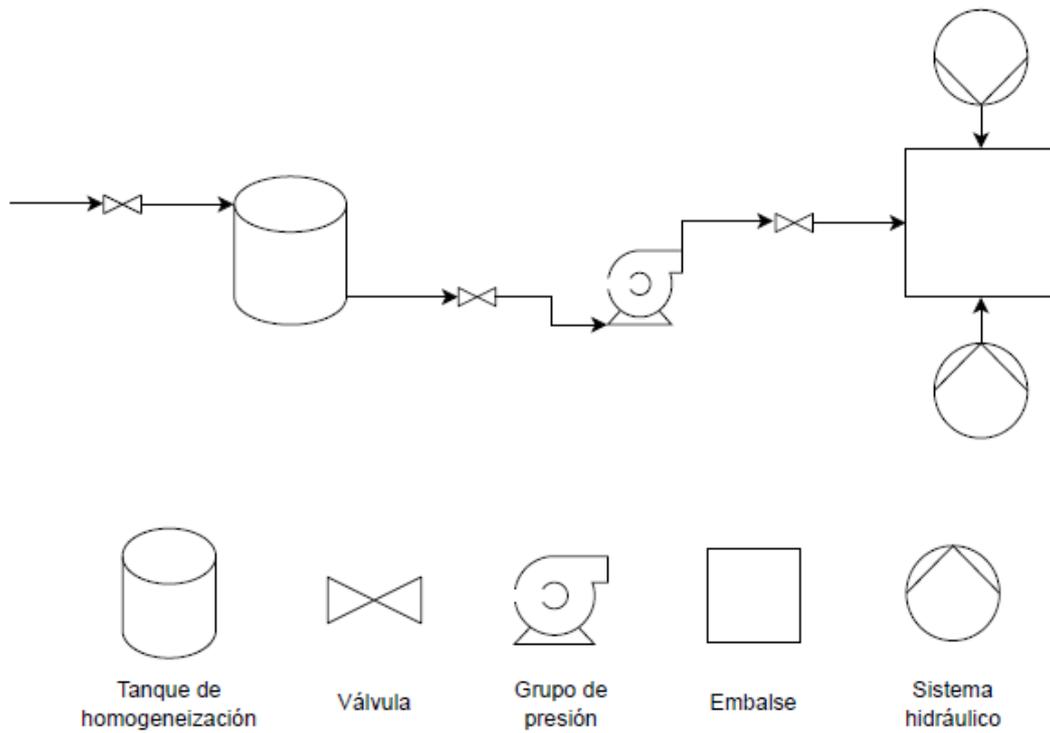


Figura 42: Diagrama de flujo del proceso de evaporación.