



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE ALPERUJO

Alumno: Sergio Díaz Pérez

Tutor: Prof. D. David Vera Candéas

Depto.: Ingeniería Eléctrica

Junio, 2017



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN
DESTILADOR SOLAR DE
ALPERUJO**

D. DAVID VERA CANDEAS, tutor del Trabajo Fin de Grado "ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE UN DESTILADOR SOLAR DE ALPERUJO" que presenta el alumno SERGIO DÍAZ PÉREZ, da su visto bueno para la defensa y evaluación del citado trabajo en la Escuela Politécnica Superior de Linares

Linares, JUNIO de 2017

EL ALUMNO:

EL TUTOR:

**NOMBRE
VERA
CANDEAS
DAVID - NIF
26240417Q**

Firmado digitalmente por
NOMBRE VERA CANDEAS
DAVID - NIF 26240417Q
Nombre de reconocimiento
(DN): c=es, o=FNMT, ou=fnmt
clase 2 ca, ou=703001765,
cn=NOMBRE VERA CANDEAS
DAVID - NIF 26240417Q
Fecha: 2017.06.23 15:03:32
+02'00'

ÍNDICE

1	OBJETIVOS.....	5
2	ABSTRACT.....	6
3	INTRODUCCIÓN	7
3.1	Origen del alperujo.....	7
3.2	Producción de alperujo.....	9
3.3	Problemática del alperujo.....	10
3.4	Secado de biomasa	11
3.4.1	Secadores solares más empleados y sus características.....	13
3.5	Otros métodos convencionales de secado de alperujo.....	14
3.5.1	Principales metodologías llevadas a cabo para la obtención de gases de combustión en cogeneración.	16
3.6	Ejemplos de plantas de secado de alperujo utilizadas en España.....	18
3.6.1	Complejo de secado y reducción de lodos oleícolas con cogeneración en Linares (Jaén).....	18
3.6.2	Planta de tratamiento y reducción de lodos en Cabra (Córdoba)	20
3.7	Secado propuesto.....	21
3.7.1	Descripción del prototipo de secado.	21
4	Materiales y metodos.	27
4.1	Prototipo utilizado.....	27
4.1.1	Materiales.	27
4.1.2	Dimensiones y peso.....	29
4.2	Caracterización de la biomasa empleada.....	31
4.2.1	Alperujo.....	31
4.3	Procedimiento de ensayo.....	38
4.3.1	Pesado del alperujo que se introducirá en el prototipo.	38
4.3.2	Llenado del prototipo.....	39
4.3.3	Toma de muestras.....	39

4.3.4	Análisis de resultados obtenidos.....	39
4.3.5	Humedad final obtenida y pesado del agua total extraída.....	43
5	Resultados y discusiones.....	44
5.1	Ensayo 1. (Cálculos reflejados en Anexo I).....	44
5.2	Ensayo 2. (Cálculos reflejados en Anexo II).....	45
5.3	Ensayo 3. (Cálculos reflejados en Anexo III).....	47
6	Mejoras de diseño y trabajo.....	50
7	Conclusiones y trabajos futuros.....	57
8	ANEXOS.....	60
8.1	ANEXO I. Resultados humedad y obtención del PCI para el primer ensayo. Hoja de cálculo.....	60
8.1.1	Peso de muestras y cálculo de humedad.....	61
8.1.2	Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.....	65
8.2	ANEXO II. Resultados humedad y obtención del PCI para el segundo ensayo. Hoja de cálculo.....	69
8.2.1	Peso de muestras y cálculo de humedad.....	69
8.2.2	Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.....	69
8.3	ANEXO III. Resultados humedad y obtención del PCI para el tercer ensayo. Hoja de cálculo.....	73
8.3.1	Peso de muestras y cálculo de humedad.....	73
8.3.2	Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.....	73
8.4	ANEXO IV. Cálculo de la eficiencia de secado del prototipo. Hoja de cálculo.....	77
8.4.1	Ensayo 1.....	77
8.4.2	Ensayo 2.....	78
8.4.3	Ensayo 3.....	78
8.5	ANEXO V. Planos diseño inicial del prototipo.....	79
8.6	ANEXO VI. Planos diseño final del prototipo.....	81
9	Bibliografía.....	84

TABLA DE FIGURAS.

Figura 1 - Proceso de obtención del aceite por prensado,[2].	7
Figura 2 - Proceso de obtención del aceite por centrifugación (3 fases),[2].	8
Figura 3 - Proceso de obtención del aceite por centrifugación (2 fases),[2].	8
Figura 4 - Esquema contenido alperujo por tonelada de aceituna,[1].	10
Figura 5 - Secador indirecto	12
Figura 6 - Esquema secador indirecto	12
Figura 7 - Secador directo	12
Figura 8 - Esquema secador de gabinete	13
Figura 9 - Secador de gabinete	13
Figura 10 - Secador solar de efecto invernadero, [7].	14
Figura 11 - Interior del tromel	15
Figura 12 - Secador rotativo tipo tromel.	15
Figura 13 - Balsa de alperujo de Troil Vegas Altas S.C. en Valdetorres (Badajoz).	15
Figura 14 - Esquema planta de cogeneración con MCI.A.[12]	17
Figura 15 - Esquema planta de cogeneración con MTG, [14].	18
Figura 16 - Planta de secado y reducción de lodos oleícolas con cogeneración en Linares (Jaén), [11].	19
Figura 17 – Motor Rolls-Royce Bergen.	19
Figura 18 - Características de la planta, [13].	20
Figura 19 - Planta de tratamiento y reducción de lodos en Cabra (Córdoba), [13].	21
Figura 20 - Modelo 3D del primer diseño del prototipo.	22
Figura 21 - Modelo 3D prototipo final.	23
Figura 22 - Prototipo final utilizado.	24
Figura 23 – Distinción de las partes del prototipo.	25
Figura 24 - Incidencia de radiación solar sobre vidrio.[16]	25
Figura 25 – Compuerta delantera del prototipo.	26
Figura 26- Emplazamiento del prototipo.	27
Figura 27 – Comportamiento de radiación en vidrio.	28
Figura 28 – Panel sándwich.	28
Figura 29- Sistema de extracción de agua del prototipo.	29
Figura 30 – Modelo 3D prototipo final.	30
Figura 31 - Modelo 3D prototipo final.	30

Figura 32 - Alperujo utilizado.	31
Figura 33 - Muestras en horno mufla de temperatura regulable.	31
Figura 34 - Bomba calorimétrica empleada.	35
Figura 35 – Ejemplo valores PCS en bomba calorimétrica. Servicios técnicos Campus científico tecnológico de Linares.....	35
Figura 36 - Alperujo totalmente seco.	37
Figura 37 – Pesada del alperujo a introducir en prototipo. (Primer ensayo).....	38
Figura 38 - Extensión del alperujo en prototipo.....	39
Figura 39 - Agua extraída tras dos días de secado.....	40
Figura 40 - Estratificación formada durante el proceso de secado.....	41
Figura 41 - Líquido repelente de lluvia.....	50
Figura 42 – Condensación de agua sobre cristal sin uso de líquido hidrofóbico. ..	51
Figura 43 - Condensación de agua sobre cristal utilizando líquido hidrofóbico.	51
Figura 44 - Rejillas empleadas como superficie de plataforma.	52
Figura 45 - Diseño tamiz utilizado 1.....	53
Figura 46- Diseño tamiz utilizado 2 y Figura 47 - Diseño tamiz utilizado 3.....	53
Figura 48 - Extendido de alperujo sobre tamiz.....	54
Figura 49 - Inserción de tamiz en prototipo.....	54
Figura 50 - Resultado alperujo sobre tamiz. (Vista desde la compuerta exterior del prototipo).	54
Figura 51 - Aceite retenido en el prototipo.	55
Figura 52 - Aceite extraído y Figura 53 - Aceite sometido a horno.....	55
Figura 54 - Topo eléctrico desarrollado por Thermo-System.[22]	58
Figura 55 – Topo eléctrico aplicado a lodos procedentes de EDAR	58
Figura 56 - Gestor de lodos desarrollado por Thermo-System.[23].....	59
Figura 57 - Mecanismo de agitación del gestor de lodos.[23]	59

1 OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto experimental consistirá en el estudio y desarrollo de un prototipo, cuyo principio de funcionamiento se basa en la destilación solar, y que se encargará de llevar a cabo el proceso de secado del alperujo.

El interés por este residuo originado durante el proceso de extracción del aceite de oliva, radica en el alto contenido en humedad que este posee, lo que imposibilita su aprovechamiento energético de forma directa. Sin embargo, si conseguimos la reducción de este alto contenido en humedad, podemos obtener una fuente de energía limpia, que podrá utilizarse como combustible biomásico (orujillo), en calderas de combustión para la producción de energía eléctrica y/o térmica.

Este proyecto de investigación, se basa por tanto en la experimentación con un prototipo de secado solar para la reducción de la humedad contenida en el alperujo. Se llevará a cabo un planteamiento de la reducción de humedad con respecto a los días de exposición al proceso de secado, así como el planteamiento del contenido energético del combustible.

La principal característica de este prototipo, será la capacidad de condensar el agua contenida en el residuo, pudiendo ser extraída esta última. De esta manera podremos obtener del proceso un combustible con altas cualidades energéticas, además de una fuente de agua limpia utilizable para proceso o regadío de olivar adyacente.

2 ABSTRACT.

The aim of this experimental project will consist of the study and development of a prototype whose works with solar distillation principle, and take over the drying process of the two phases oil waste.

The interest in this residue begins during the oil extraction process, when due to the high moisture content that has, makes it imposible to use it as a fuel.

However if we achieve the decrease of this high moisture content, we can get a source of clean energy. This source can be used as fuel in biomass boilers for the production of electric and thermal energy.

So this research project is based on experimentation with a solar drying prototype, to reduce the moisture content in the two phases oil waste.

There will be shown the reduction of moisture content regard to the exposition days of dried process, as well as the increase of the energetic content of the fuel.

The principal characteristic of this prototype will be the aptitude to condense the water contained in the residue and extract this later. We will be able to obtain a fuel with high energetic qualities, besides a source of clean water that can be used in irrigation or another processes.

3 INTRODUCCIÓN

Cuando hablamos de biomasa, nos referimos a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. Este concepto comprende tanto los productos de origen vegetal como los de origen animal.

Esta materia orgánica, puede ser utilizada como combustible en procesos de combustión, liberando la energía que contiene en forma de calor, electricidad o energía mecánica.

En nuestro estudio, pretendemos conseguir el aprovechamiento de la biomasa producida por el olivo, concretamente de un subproducto obtenido durante el proceso de obtención del aceite, que recibe el nombre de alperujo, [1].

3.1 Origen del alperujo.

El proceso de obtención del aceite de oliva en las almazaras, se puede llevar a cabo principalmente por centrifugación en dos o tres fases (Figura 2 y Figura 3) y en un reducido número por prensado (Figura 1).

Según el procedimiento que se lleve a cabo, obtendremos una serie de subproductos. A continuación, se presenta un esquema con los distintos subproductos obtenidos, según el procedimiento que se lleve a cabo:

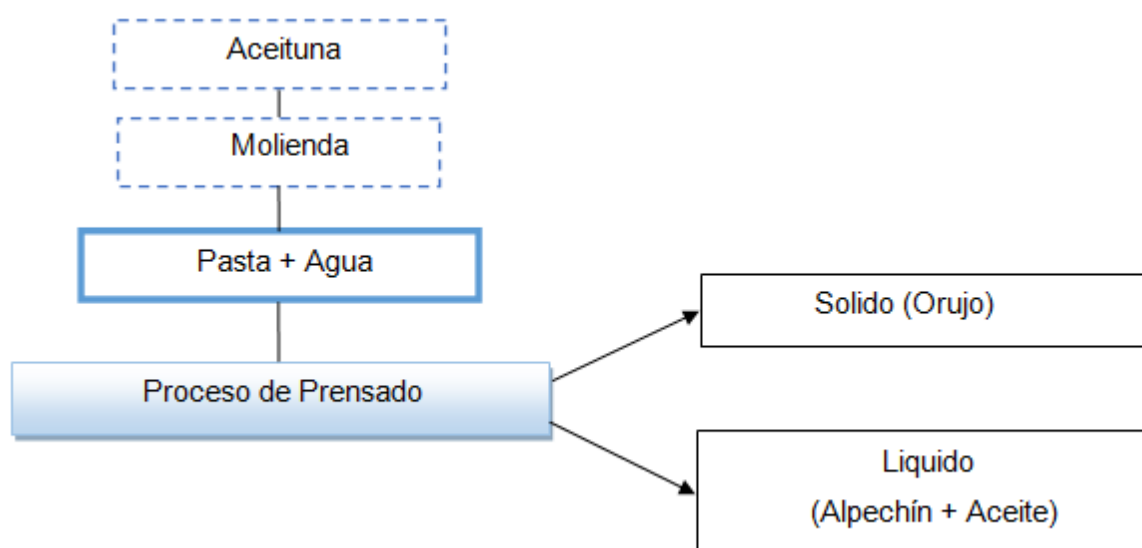


Figura 1 - Proceso de obtención del aceite por prensado,[2].

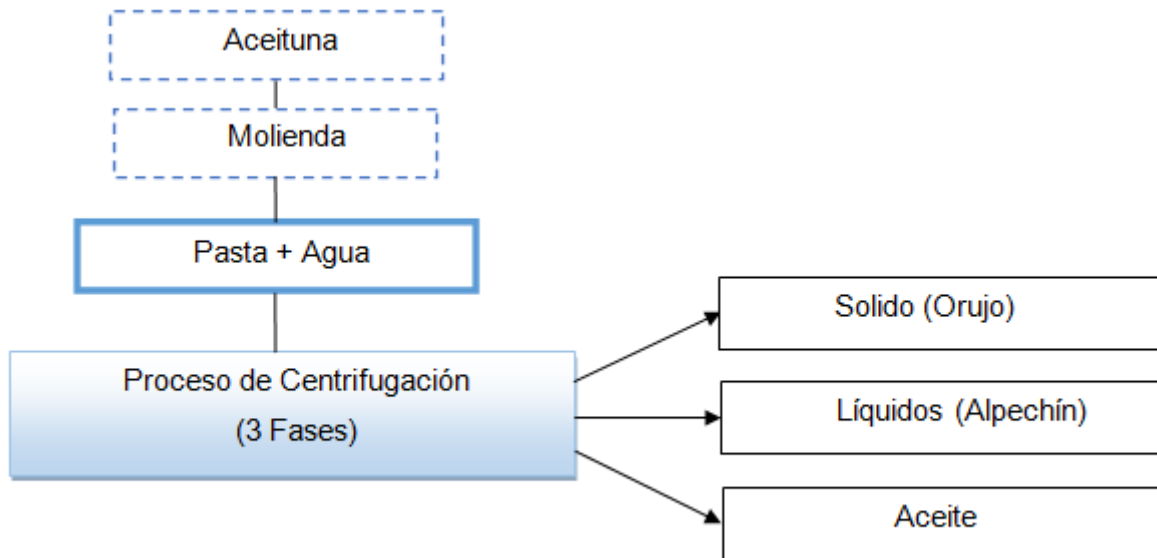


Figura 2 - Proceso de obtención del aceite por centrifugación (3 fases),[2].

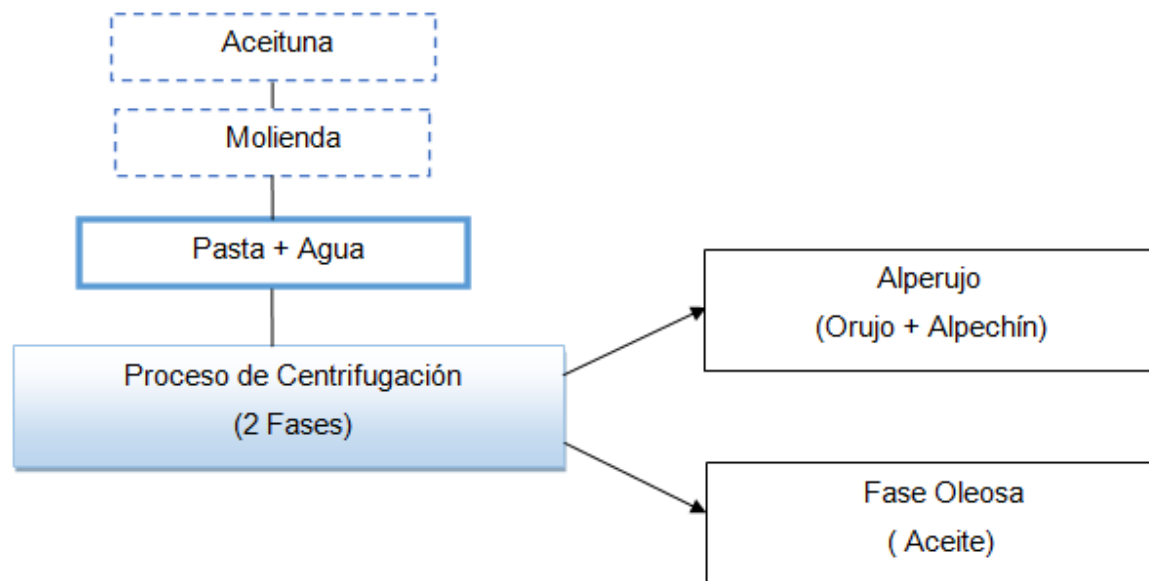


Figura 3 - Proceso de obtención del aceite por centrifugación (2 fases),[2].

Actualmente, el 90% de las almazaras utilizan el proceso reflejado en la "Figura 3" debido a la obtención de bajos rendimientos y a la dificultad de limpieza que supone el proceso de prensado, así como la alta cantidad de agua y la problemática que presenta el alpechín para su aprovechamiento que surge en el proceso de centrifugación de 3 fases,[2].

Para nuestro estudio, por tanto, nos interesara el proceso de centrifugación en dos fases, reflejado en la "Figura 3", del que obtendremos como subproducto el alperujo.

3.2 Producción de alperujo.

El interés de estudio sobre este residuo, radica en la alta producción por tonelada de aceite tratado, que obtenemos durante el proceso. Para hacernos una idea, a continuación, se reflejan algunos datos sobre la producción de alperujo en Andalucía.

En Andalucía, por cada tonelada de aceituna procesada se obtiene aproximadamente 0,27 toneladas de aceite de oliva y 0,73 toneladas de alperujo. Es decir, una campaña media genera unos 3.000.000 t/año de alperujo con una humedad aproximada del 60%-65%, [1].

El alperujo que se genera, es almacenado en balsas, y posteriormente puede ser sometido a dos procesos:

- Un proceso físico de segunda centrifugación, que sirve para repasar el alperujo obtenido.
- Un proceso químico, para conseguir extraer el aceite contenido en el alperujo (aproximadamente un 5% de su composición es aceite). Si se somete a un proceso de lavado con un disolvente orgánico, concretamente el hexano, podemos obtener este aceite, que recibe el nombre de aceite de orujo.[1]

En Andalucía, un 30% del orujo es sometido al primer proceso mencionado, consistente en el repaso del alperujo, su posterior secado (hasta un 40% de humedad) y su uso como combustible para producción de energía eléctrica.

Por otro lado, en el segundo proceso que hemos mencionado, basado en el tratamiento del alperujo, para la obtención de aceite, tiene como ventaja, la obtención de un subproducto denominado orujillo, que resulta muy interesante industrialmente, ya que este último únicamente posee un 10% de contenido en humedad y tiene muy buenas propiedades como combustible (con un poder calorífico de 4200 kcal/kg aproximadamente), pudiendo ser utilizado tanto para generación de energía térmica en industrias como para generación de energía eléctrica, [1].

A continuación, en la "Figura 4", se representa un esquema resumen de la producción de orujo de dos fases (alperujo), por cada tonelada de aceituna tratada en la almazara.

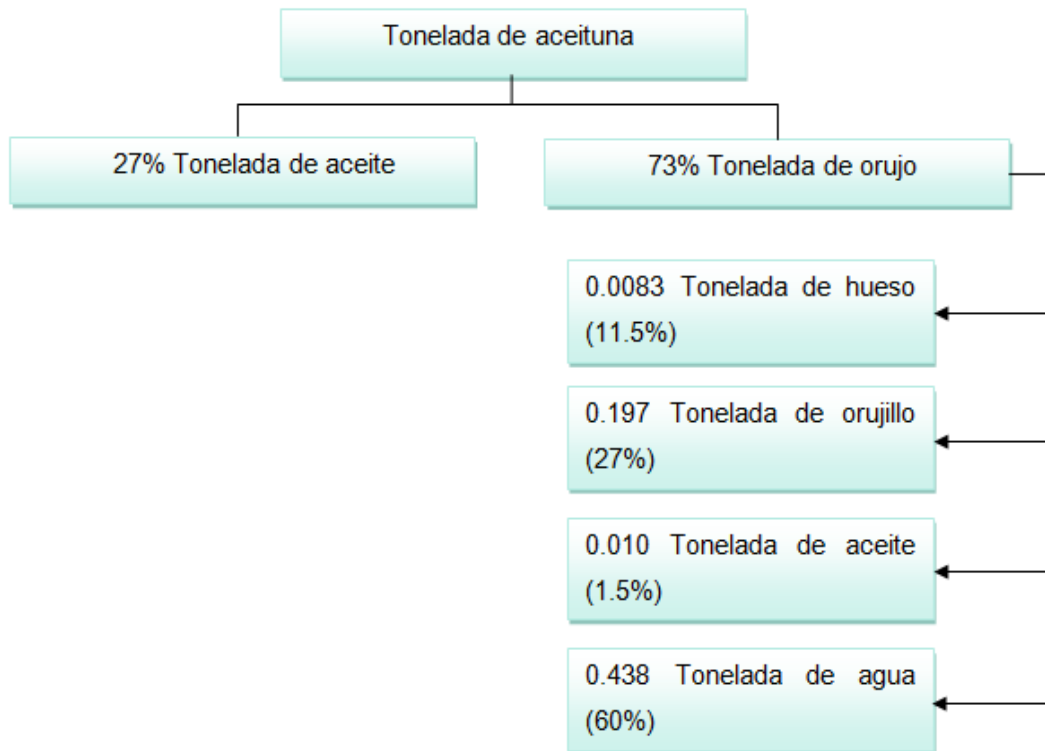


Figura 4 - Esquema contenido alperujo por tonelada de aceituna,[1].

3.3 Problemática del alperujo

El principal problema que muestra el alperujo, es su alto contenido en humedad, en torno a un 60 - 70 %, lo cual nos impide su aprovechamiento directo, por ejemplo, en labores de combustión para generación de energía eléctrica.

Además de esto, también posee un pH ácido (5.4) así como un alto contenido en materia orgánica (90%) del que casi un 50% son ligninas y un 2.5% grasas, [1].

Este alto contenido en humedad se debe a que, en el proceso de centrifugación de dos fases, la fracción acuosa es añadida al volumen de orujo producido (formándose así el alperujo).

Por otro lado, el alperujo está compuesto por una gran cantidad de sólidos finos y compuestos lo que provoca que este tenga mucha fluidez, y por tanto dificulte las labores de almacenamiento, transporte y secado. Esto ha llevado a que su almacenamiento se lleve a cabo por vertido en balsas, el transporte interno mediante tornillos sin fin cerrados en lugar de por cintas transportadoras y el transporte externo con camiones con cajas selladas.

El objetivo de nuestro estudio será, a través de un proceso de secado solar, reducir este alto contenido de humedad de un 60% a entorno un 40%, habilitando así el uso de este producto como combustible, para la generación de energía eléctrica.

3.4 Secado de biomasa

En los procesos de valorización energética de la biomasa, un factor clave a tener en cuenta es el poder calorífico inferior. Entendemos por poder calorífico inferior, a aquella energía capaz de desprender un combustible cuando se lleva a cabo su combustión, teniendo en cuenta la pérdida de energía que supone la presencia de humedad en este.

Como ya hemos comentado anteriormente, el problema que presenta normalmente el residuo que vamos a utilizar, es su alto grado de humedad, lo que reduce considerablemente su poder calorífico y por tanto su capacidad energética. Es por ello, que debemos reducir la humedad, sometiendo nuestro residuo a un proceso de secado, que consiga reducir su humedad, y, por tanto, su aprovechamiento energético, [3].

Cuando se habla de secado de biomasa, nos referimos a la reducción del contenido en humedad que esta posee, en nuestro caso, buscaremos la reducción del contenido en humedad del alperujo (60% - 70% en humedad), hasta alrededor de un 40% que es considerado un valor óptimo para su uso como combustible.

A través de un proceso de secado, la mayor parte de la humedad de la biomasa puede ser eliminada. El resultado es una reducción de peso de la biomasa, [4].

El proceso de secado, puede generar una disminución de los gastos de tratamiento, almacenamiento y transporte, así como suponer nuevas posibilidades de venta y aplicación.

Existen distintos procesos para llevar a cabo el secado de biomasa, sin embargo, en este estudio, nos centraremos en el secado solar, el cual aprovecha la radiación del sol para llevar a cabo el secado de un producto, puede clasificarse según la forma en que la radiación calienta el aire, y según la manera en que el aire llega al producto.

Clasificación según la manera en que la radiación calienta el aire:

- Secado solar directo

La radiación solar incide directamente por el producto a ser secado, adquiriendo así la energía de evaporación necesaria. Después, la humedad formada en los alrededores del producto es recuperada por el aire tomado del exterior. El material es removido mediante maquinaria específica para favorecer el secado de toda la masa, [5].

- Secado solar indirecto

La radiación solar es captada por un colector por donde circula cierta cantidad de aire (realiza efecto invernadero: deja entrar energía, pero no que salga), este flujo de aire se calienta e ingresa a la cámara de secado, donde al tomar contacto con el residuo, se produce el secado, [5].

El sistema colector-cámara secado puede diseñarse de distintas formas para integrarse a diferentes equipos de secado solar:

Indirecto: los dos elementos están separados y la cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar, ("Figura 5 y Figura 6"), [5].

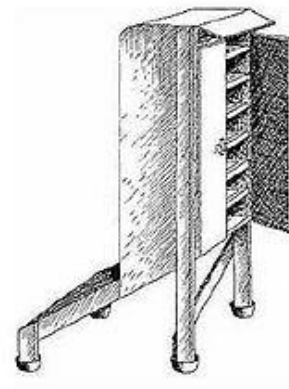
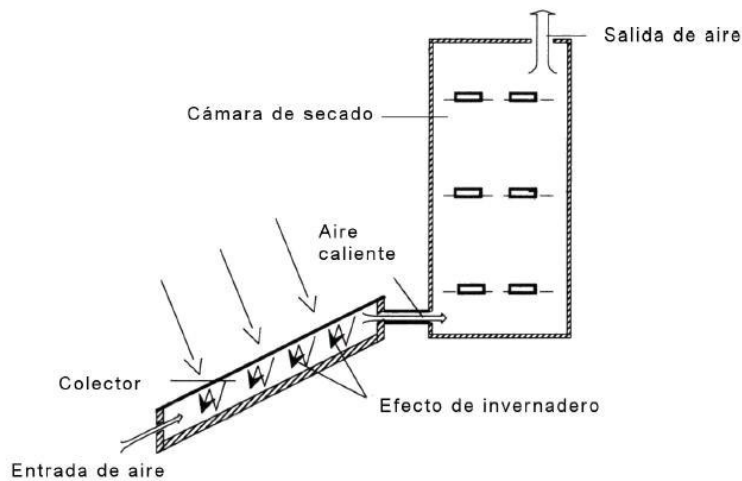


Figura 5 - Secador indirecto

Figura 6 - Esquema secador indirecto

Directo: Los dos elementos se juntan, de manera que la cámara que contiene el producto, hace de colector, recibiendo la radiación solar, ("Figura 7"), [5].

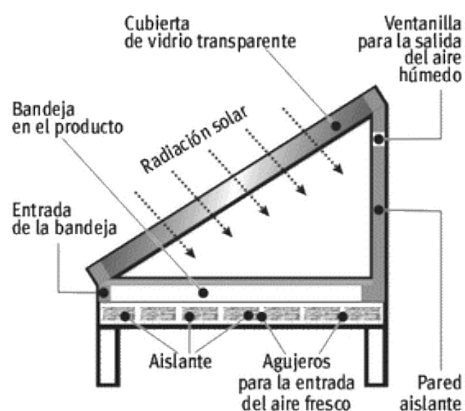


Figura 7 - Secador directo

- Secador solar mixto

La radiación puede ser recibida tanto en un colector previo como en la misma cámara, [5].

Clasificación según la manera en que el aire llega al producto:

- Circulación natural.

El aire se mueve por la diferencia de temperatura producida en las diferentes partes del equipo. Promoviendo así la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se recomienda para equipos pequeños, ya que, en equipos de grandes dimensiones, se produce una reducción de la velocidad en el interior de la cámara, [5].

- Circulación forzada.

El aire se mueve gracias a un ventilador. En este caso, se consigue resolver el problema de la velocidad del aire en equipos grandes, pero con la desventaja de que el ventilador requiere de la disposición de una fuente energética eléctrica adicional, [5].

3.4.1 Secadores solares más empleados y sus características:

1) Secador solar de gabinete

Este tipo de secadores, tienen forma de caja compacta. La energía es producida debido a la radiación solar, que atraviesa la cubierta de cristal, es absorbida por una placa absorbidora y, por radiación y convección transmitida al producto a secar, (“Figura 8 y Figura 9”). Dispone de una apertura inferior por donde entra el aire frío, y de una apertura superior por donde sale el aire caliente, con cierto nivel de humedad, [6].

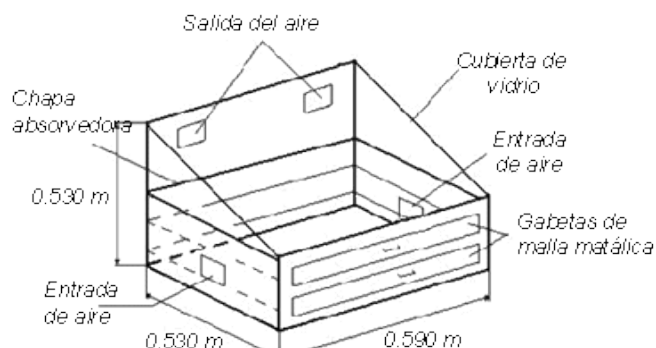


Figura 8 - Esquema secador de gabinete



Figura 9 - Secador de gabinete

2) Secador solar de efecto invernadero. ("Figura 10").

El funcionamiento de este tipo de secador solar, es muy similar a los invernaderos utilizados en agricultura. El principal objetivo de este tipo de secadores es intentar almacenar el calor de los rayos del sol, cuando estos traspasan una cubierta, generalmente de plástico. El aire caliente sale a través de conductos de ventilación. Se utiliza para grandes cantidades de secado, [7].



Figura 10 - Secador solar de efecto invernadero, [7].

Más información y tipos de secaderos solares de biomasa y otras aplicaciones se pueden encontrar en los artículos de investigación siguientes:

- Referencia 1: A review of solar drying technologies. [8]
- Referencia 2: Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. [9]

3.5 Otros métodos convencionales de secado de alperujo.

Aunque en nuestro estudio nos centremos en la reducción de la humedad del alperujo a través de la realización de un secado solar, para su posterior aprovechamiento, no debemos de olvidar que existen otros procesos más convencionales con los que conseguir el secado de este producto.

Este secado convencional se lleva cabo en secaderos rotativos o continuos por los que se hace circular aire caliente, de manera que el aire caliente es el encargado de producir el secado. Existe una gran variedad de secaderos, por lo que la selección de un secadero u otro dependerá de diversos factores, como pueden ser el tamaño de la materia prima utilizada, la temperatura con la que se vaya a trabajar o el tiempo de residencia, [10].

El secador más utilizado es el secador rotativo o tromel de secado; que consiste en un cilindro de diámetro y longitud determinado, que gira sobre unas ruedas motrices y cuyo interior está formado por unas palas encargadas de facilitar la circulación, podemos verlo a continuación en "Figura 11" y "Figura 12" [10].



Figura 12 - Secador rotativo tipo tromel



Figura 11 - Interior del tromel

Para conseguir el aire caliente, encargado de secar el alperujo, se requiere una fuente de energía térmica adicional, que suele obtenerse o por combustión de otros subproductos originados en la extracción del aceite (por ejemplo, el hueso de aceituna) o mediante sistemas de cogeneración.

En estos últimos, el principal objetivo es el almacenamiento del alperujo obtenido del proceso de extracción del aceite de oliva, para que, tras un tratamiento, se logre la extracción del aceite residual que este todavía posee tras su paso por la almazara.

El proceso es muy sencillo y se puede dividir en varias etapas:

1. Almacenamiento del alperujo.

El alperujo, obtenido en la almazara, se almacena en balsas durante el periodo de tiempo que dura el proceso de extracción y secado. Este almacenamiento en balsas, se debe llevar a cabo atendiendo a una correcta impermeabilización del suelo, así como que la extracción del mismo se pueda realizar sin ningún impedimento, [11].



Figura 13 - Balsa de alperujo de Troil Vegas Altas S.C. en Valdetorres (Badajoz).

2. Transporte.

El transporte del sistema de almacenamiento a los secaderos, puede ser llevado a cabo a través de tornillos sin fin, tolvas y cintas transportadoras, [10].

3. Secado del alperujo.

Como el objetivo en este tipo de plantas es la obtención del aceite que aún se puede extraer del alperujo, que suele ser un 5%, en el proceso de secado se tendrá que llevar a cabo a temperaturas que no supongan un deterioro de dicho aceite.

Normalmente para conseguir un secado óptimo, una parte del alperujo ya seco se recircula y se mezcla con la alimentación, para que así el tromel de secado trabaje con una mezcla de menor contenido en humedad.

En las plantas de cogeneración, los gases de combustión que proporcionan la energía térmica que se introducirá en los secaderos, se pueden obtener mediante diferentes metodologías, el uso de una u otra, dependerá de las necesidades térmicas del proceso, algunas de ellas serán desarrolladas en el próximo apartado*,[11].

4. Extracción

Tras pasar por la etapa de secado, conseguiremos reducir la humedad del alperujo a un 10 - 15 % aproximadamente. Este alperujo, además, tendrá un contenido en aceite del 5% por lo que, para la extracción de este aceite, se llevará a cabo un proceso químico. El alperujo es sometido a un lavado con hexano, de manera que este, al contactar con el alperujo, retiene el aceite, para más tarde extraer por un lado el hexano con el aceite y por el otro el residuo sobrante, con un contenido en aceite mínimo, [11].

3.5.1 *Principales metodologías llevadas a cabo para la obtención de gases de combustión en cogeneración.

3.5.1.1 Motor de combustión interna alternativo (MCIA).

Los motores alternativos de combustión interna, suelen ser utilizados para plantas de cogeneración que reclamen menor potencia. La función de estos es convertir la energía química contenida en un combustible en energía eléctrica y térmica, para ello, [12]:

- 1) Se transforman los movimientos lineales de los pistones del motor en un eje de giro.

2) La energía mecánica producida, se transforma en eléctrica gracias a un alternador.

3) La energía térmica, se obtiene de los propios gases de escape producidos en el circuito de refrigeración.

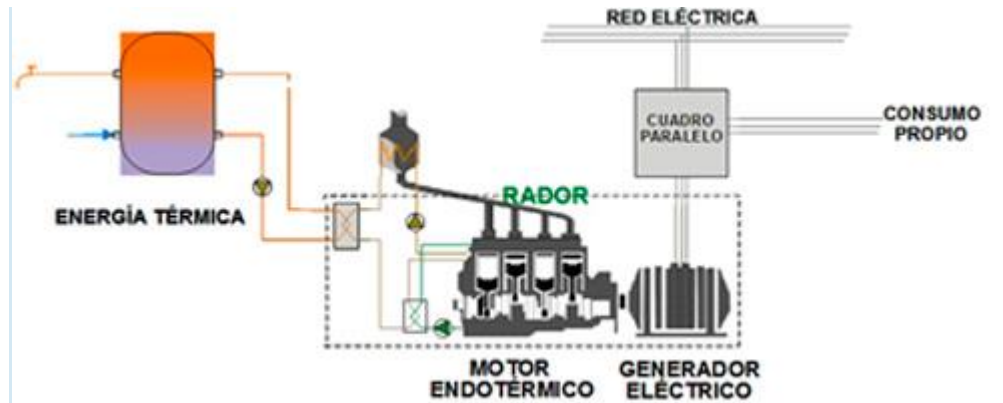


Figura 14 - Esquema planta de cogeneración con MCIA.[12]

El principal inconveniente que presentan estos motores es que los humos de combustión producidos, son humos muy sucios debido a que estos llevan aceites de refrigeración, por lo que para que estos humos sean recirculados para su aprovechamiento, se deberá de integrar un intercambiador de calor, [12].

3.5.1.2 Turbina de gas

El funcionamiento de la turbina de gas, se basa en el mismo principio que el motor alternativo de combustión interna, es decir, la transformación de energía química contenida en un combustible, en energía eléctrica y térmica. Estas generalmente se utilizan para plantas que reclamen mayor potencia. Se puede decir que la turbina de gas está compuesta por varias partes, [13]:

- Compresor
- Sistema de aporte de calor al fluido
- Expansor

Principio de funcionamiento: el aire tomado de la atmosfera es comprimido para posteriormente entrar en la cámara de combustión, una vez en esta, el aire se mezcla con el combustible y se produce la ignición, de esta manera los gases producidos por la combustión entran en la turbina, donde se expansionan y mueven el eje que acciona el compresor de la turbina y el alternador, [13].

El ciclo térmico de gas que siguen es el ciclo de Brayton

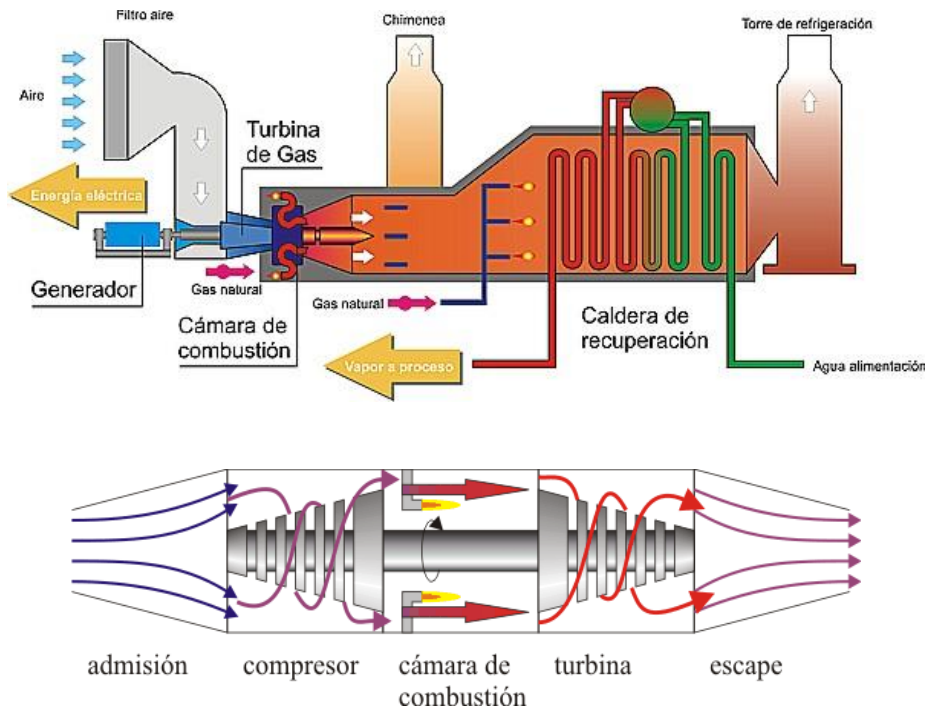


Figura 15 - Esquema planta de cogeneración con MTG, [14].

3.5.1.3 Turbina de vapor.

En estos sistemas, la energía mecánica se produce por la expansión del vapor de alta presión procedente de una caldera convencional.

La turbina de vapor (ciclo Rankine convencional) es una turbo-máquina que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica, a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, [13].

3.6 Ejemplos de plantas de secado de alperujo utilizadas en España.

3.6.1 Complejo de secado y reducción de lodos oleícolas con cogeneración en Linares (Jaén).

Planta situada en la localidad de Linares, puesta en marcha por la empresa Valoriza Energía, del Grupo Sacyr-Vallehermoso, ("Figura 16").

Dispone de una capacidad para procesar alrededor de 200.000 t al año de orujos de la aceituna. La humedad relativa del alperujo tratado es del 65%, que queda reducida a través de tres trómeles de secado hasta un 10%, [11].

La planta es explotada por tres sociedades distintas:

- Compañía Orujera de Linares (COLinares), -- Encargada de la obtención del aceite de orujo de la almazara, así como el almacenamiento y el deshuesado.
- Compañía Energética de Linares (CELinares) -- Encargada de proceso de reducción de lodos mediante planta de cogeneración con turbina de gas.
- Bioeléctrica de Linares (Biolinares)-- Encargada de planta para valorización energética de biomasa y aprovechamiento del orujillo (obtenido tras secado del alperujo).



Figura 16 - Planta de secado y reducción de lodos oleícolas con cogeneración en Linares (Jaén), [11].

El alperujo se almacena en las 4 balsas con las que cuenta la planta. Posteriormente es secado en los tres trómeles de secado de los que dispone la fábrica, diseñados y suministrados por la empresa José Doblas e Hijos, con sus respectivos equipos auxiliares. La energía térmica que permite el secado, proviene de los gases de escape de los motores de gas de la instalación de cogeneración. La instalación de cogeneración está formada por un total de tres motores de gas Rolls-Royce Bergen, modelo B35, ("Figura 17").



Características motor utilizado, [11]:

- 40V-20AG
- Ciclo Otto
- Potencia = 8,33 MW
- Presión gas alimentado = 45 bar

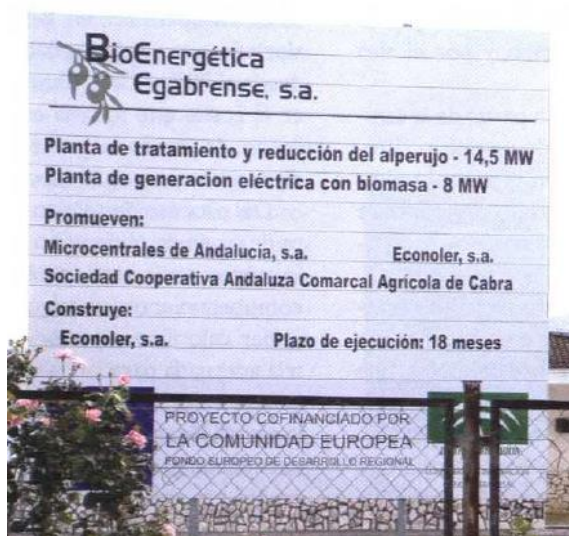
Figura 17 – Motor Rolls-Royce Bergen.

Tras la extracción, se obtiene aceite de orujo, mientras que el residuo resultante se utiliza como combustible para una turbina de vapor, capaz de generar energía eléctrica gracias a un alternador, [11].

3.6.2 Planta de tratamiento y reducción de lodos en Cabra (Córdoba)

Planta de tratamiento y reducción de lodos en Cabra (Córdoba). La instalación está formada por, [15] :

- Planta de secado, encargada del tratamiento y la reducción de lodos en el alperujo mediante una turbina de gas (14.5 MW).
- Planta de biomasa, encargada de la generación de energía eléctrica mediante una turbina de vapor (8 MW), utilizando como combustible el orujillo obtenido del proceso de secado.
- Planta de Gas Natural Licuado, encargada de abastecer de gas natural a la planta, debido a la inexistencia de una red de distribución en la zona.
- Subestación eléctrica.



El proyecto es dirigido por Bioenergética Egabrense, S.A., resultado de la asociación de la sociedad Cooperativa Andaluza Comarcal Agrícola de Cabra (10%) con las empresas Microcentrales de Andalucía S.A. (45%) y Econoler S.A. (45%), [15].

Figura 18 - Características de la planta, [13].

La planta de secado, funciona a partir de una turbina de gas natural, a la que va incorporada un alternador, pudiendo así producir tanto energía eléctrica como térmica. La energía eléctrica se emplea para necesidades de la cooperativa y de las instalaciones, mientras que la térmica se utiliza en el proceso de secado (ahorro de combustible).

La planta de gas natural licuado, está a cargo de la empresa Ham, a ella llegan los camiones y se almacena en los depósitos para posteriormente abastecer al grupo generador.

La planta de biomasa funciona mediante el quemado de orujillo, con el fin de producir unas 7.300 horas/año de energía eléctrica.

Para conseguir la energía eléctrica se utiliza un alternador de 8MW. La energía necesaria para mover el alternador se obtiene gracias a una turbina acoplada al eje este, que funciona con vapor sobrecalentado, que se recircula a la planta de tratamiento y reducción de lodos cuando este es condensado, [15].



Figura 19 - Planta de tratamiento y reducción de lodos en Cabra (Córdoba), [13].

3.7 Secado propuesto.

Como ya hemos mencionado anteriormente, existen diversos procesos con los que conseguir el secado del alperujo utilizando la radiación solar, sin embargo, en este proyecto nos centraremos en el estudio de un prototipo de secado, cuyo principio de funcionamiento se basa en la condensación solar, con la cual no solo conseguiremos la reducción de la humedad del alperujo, sino que también se procederá a la extracción del agua que contiene este.

Actualmente existen diversos procedimientos que funcionan de igual manera que nuestro prototipo, como por ejemplo el secador solar de efecto invernadero, el cual almacena el calor producido por la radiación solar, provocando que el aire caliente lleve a cabo el secado. Sin embargo, ninguno de estos, lleva incorporado un sistema encargado de la extracción del agua retenida en el alperujo.

3.7.1 Descripción del prototipo de secado.

A la hora de diseñar el prototipo de secado de alperujo para nuestro proyecto, se deben de tener en cuenta una serie de consideraciones que permitan una ejecución del proceso de manera correcta:

1) El prototipo deberá de tener unas dimensiones mínimas, para garantizar la evaporación del agua del residuo de manera abundante y constante, así como garantizar el aislamiento interior, para que se produzca el denominado efecto invernadero.

2) Debe de constar de un material capaz de captar la radiación solar, y que esta quede retenida en el interior en forma de energía térmica, provocando el aumento de temperatura, un material idóneo que cumpla este requisito es un vidrio con bajo contenido en hierro.

Finalmente atendiendo a estas consideraciones, se llevó a cabo un primer diseño del prototipo, el cual podemos observar en el Anexo Planos (Diseño inicial de prototipo).

Para hacernos una idea, se lleva a cabo la impresión 3D del modelo, con la colaboración del laboratorio de impresión FABLAB ("Figura 20").

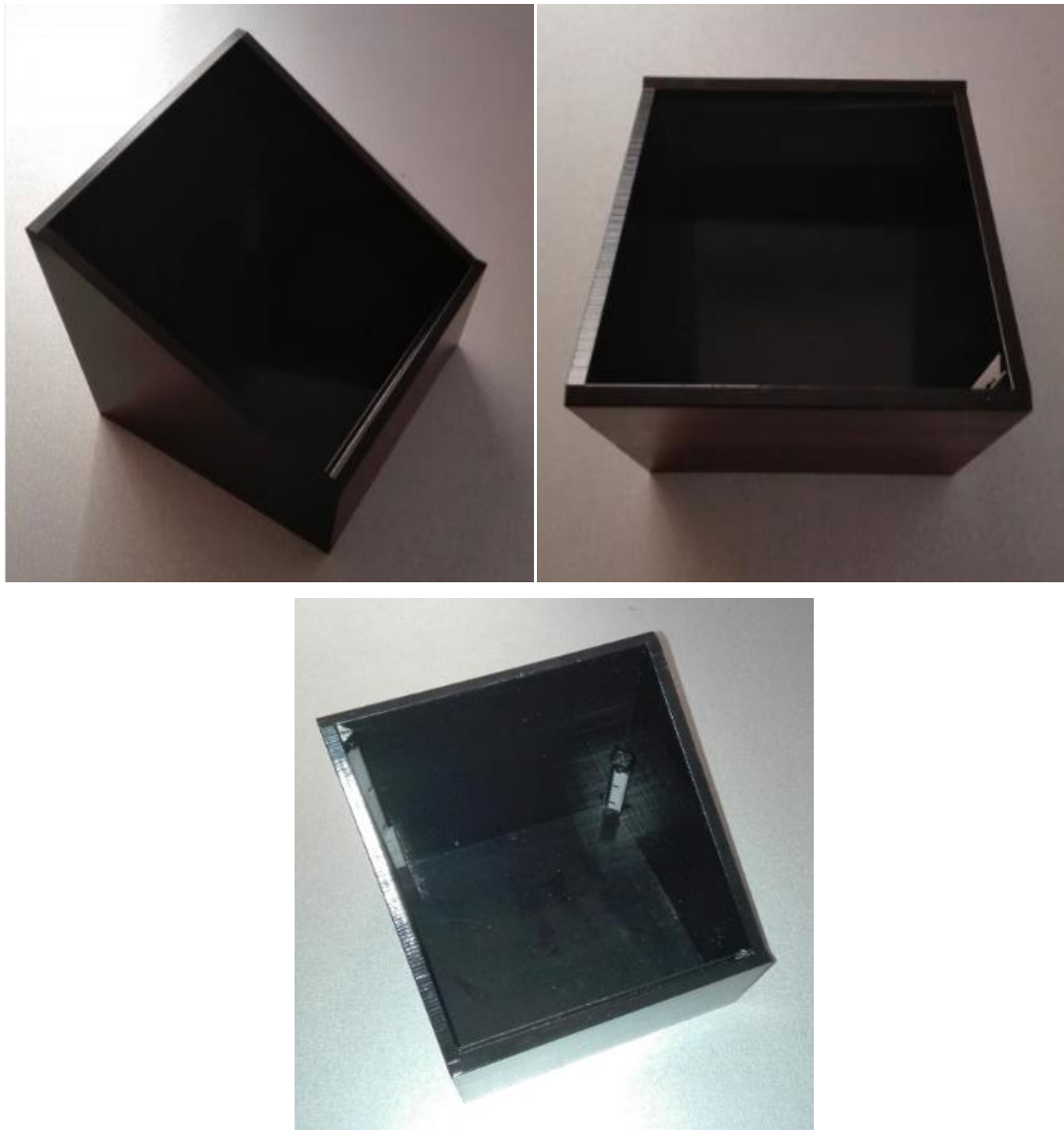


Figura 20 - Modelo 3D del primer diseño del prototipo.

Como podemos observar, este primer diseño es sensorizado en la zona interior con el objetivo de ir monitorizando el valor de la humedad durante todo el proceso de secado, ya que uno de los objetivos es estudiar el porcentaje de pérdida de humedad que se va dando durante el intervalo de tiempo en que transcurre el secado, para posteriormente realizar una gráfica que relacione este porcentaje con el PCI del residuo.

Sin embargo, este diseño, pese a cumplir todos los requisitos, resulta inviable, debido al alto coste que supondría la sensorización interior del prototipo, así como la fabricación de este como una sola pieza, lo cual además de suponer un elevado coste, dificulta la labor de acceso al residuo.

Es por ello, que se lleva a cabo un nuevo diseño, que será el definitivo, y por tanto el que se construirá y utilizará en este estudio. Este nuevo diseño no consta de sensorización interna, lo que nos implica tener que realizar el análisis del porcentaje de pérdida de agua de manera manual. Además, este se diseña diferenciando dos piezas, una fija y una móvil, para facilitar el acceso al residuo.

De igual manera, se lleva a cabo la impresión del modelo en 3D ("Figura 21"):



Figura 21 - Modelo 3D prototipo final.

El prototipo final utilizado para llevar a cabo este proyecto de investigación ha sido construido por la empresa "EXNI S.L", empresa ubicada en la ciudad de Linares encargada del diseño y fabricación de bienes y equipo, siendo un referente en este sector a nivel nacional. El resultado final queda reflejado en la "Figura 22".



Figura 22 - Prototipo final utilizado.

Como podemos observar a continuación en la "Figura 23" y como hemos explicado anteriormente, el prototipo está formado por una parte superior móvil, y una parte inferior fija que forma el cuerpo del prototipo.

La parte inferior, consiste en una cámara, donde ira situado el alperujo, y donde quedara almacenado el calor causante del secado de este.

La parte superior se construye con la finalidad de tener una parte móvil, que facilite el proceso de llenado de la cámara. En esta se coloca un vidrio como techo, con la función de captar la radiación solar y retener está en forma de calor en el interior de la cámara, produciéndose así un efecto invernadero, que será el causante del secado de nuestro alperujo.

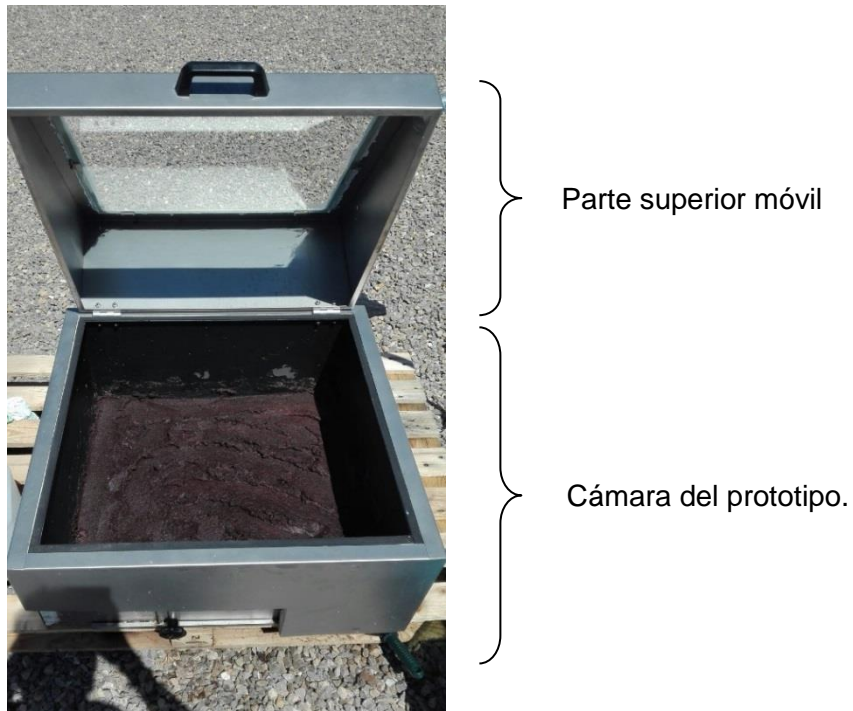


Figura 23 – Distinción de las partes del prototipo.

La finalidad del vidrio colocado en el techo de la cámara es que, a través de este, la energía solar pasa utilizando la onda corta, y cuando lo atraviesa, la energía no puede escapar de la cámara ya que se refleja en el vidrio en forma de onda larga ("Figura 24"). De esta manera se produce el efecto invernadero ya mencionado, y se logra consigo el secado del alperujo.[16]

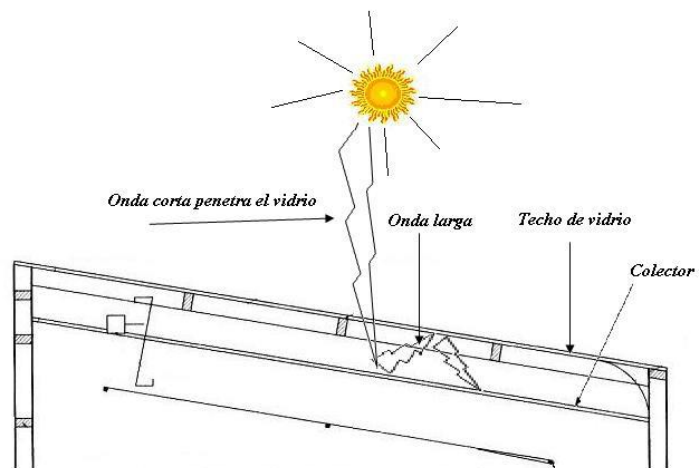


Figura 24 - Incidencia de radiación solar sobre vidrio.[16]

Cuando en el interior de la cámara, el aire caliente se mueve a través del alperujo, el agua contenida en este se evapora, de manera que el vapor generado, logra condensarse cuando toma contacto con el vidrio del techo, debido a la diferencia de temperatura. Una vez condensado el vapor de agua, las gotas de agua se irán deslizando por el vidrio hasta un conducto que da a un depósito, donde se irá almacenando el agua extraída.

El agua que conseguimos almacenar, podrá ser reutilizada para procesos posteriores de aprovechamiento del combustible obtenido tras el secado (orujillo), o bien para otros fines, como podría ser el empleo para aguas de riego.

El conducto que se encuentra al final del vidrio, utilizado para extraer el agua, debe de tener una cierta inclinación, para favorecer la extracción del agua, además a la hora de colocar el prototipo, también le daremos a este cierta inclinación para facilitar el proceso.

Como hemos podido observar anteriormente en la "Figura 21", nuestro prototipo también dispone de una compuerta delantera en la parte inferior izquierda, esta se construye con la finalidad de tener un sistema de apertura adicional, que facilite las labores de mantenimiento y limpieza del prototipo ("Figura 25").



Figura 25 – Compuerta delantera del prototipo.

4 MATERIALES Y METODOS.

4.1 Prototipo utilizado.

4.1.1 Materiales.

A la hora de llevar a cabo la construcción del prototipo, la principal función que se busca es que este sea capaz de mantener el calor en el interior de la cámara, así como que el alperujo quede aislado totalmente del exterior.

Es por ello que la elección de los materiales empleados ha sido atendiendo a estas características, así como valorando el valor económico y la disponibilidad de estos. Por otro lado, también debemos considerar, las condiciones de trabajo a las que estaremos sometidos.

Atendiendo a todos estos factores, los materiales seleccionados para la construcción del prototipo son:

- **Acero inoxidable.**

Toda la cubierta exterior, y en general el cuerpo del prototipo, es de acero inoxidable, debido a que el emplazamiento de este será la azotea del Campus Científico Tecnológico de Linares (Figura 26), y por tanto estará sometido a la intemperie, así como a lluvia, lo que podría provocar la corrosión de nuestro prototipo. Además, no debemos olvidar que el residuo con el que trabajaremos es alperujo, cuyo contenido en aceite y materia inorgánica puede provocar la corrosión del prototipo.



Figura 26- Emplazamiento del prototipo.

- **Vidrio.**

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de construir el prototipo, es atender a que el material del techo debe de ser capaz de captar la radiación del sol, y conseguir transmitirla hasta el interior de la cámara, donde quedara retenida en forma de calor, provocando así el secado del alperujo. Los materiales idóneos para que ocurra esto son los vidrios con bajo contenido en hierro, ya que, al ser prácticamente impermeables a las radiaciones de larga longitud de onda, la radiación solar que se refleje en este, quedara retenida en el interior de la cámara, aumentando la temperatura y favoreciendo así al secado del alperujo. A este fenómeno se le conoce como efecto invernadero. [17]

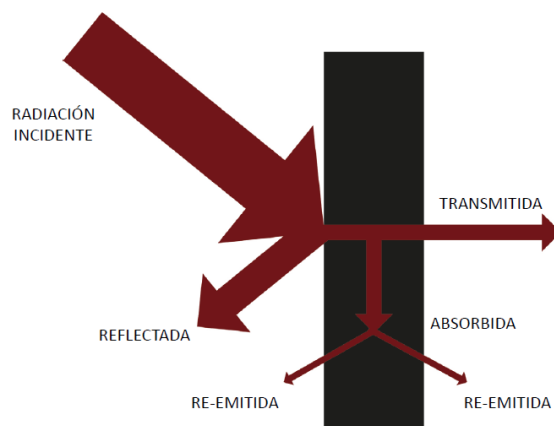


Figura 27 – Comportamiento de radiación en vidrio.

- **Aislamiento.**

Con el fin de aumentar el aislamiento interior del prototipo, y evitar la pérdida de calor. Se refuerzan las paredes con un panel sándwich, formado por dos chapas de acero perfilado encargadas de aportar la resistencia y un núcleo de corcho, encargado de las funciones de aislamiento térmico. Se puede observar a continuación en la “Figura 28”.

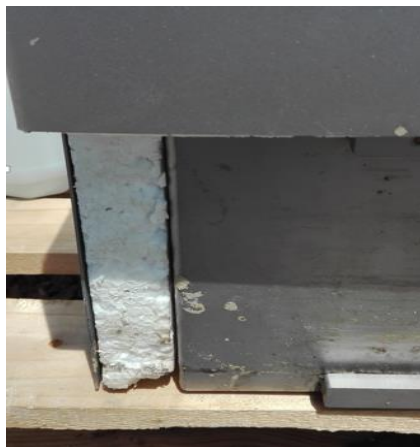


Figura 28 – Panel sándwich.

- **Sistema de extracción de agua.**

El sistema utilizado para extraer el agua se basa en una canaleta, situada al final del vidrio del techo del prototipo, y que debe de tener cierta inclinación para favorecer la extracción del agua. La canaleta ha sido construida de acero inoxidable al igual que el cuerpo del prototipo, y llega hasta un conducto que da a un depósito donde quedará almacenada el agua. A la hora de posicionar nuestro prototipo, también lo inclinaremos unos 15° para facilitar la operación, (“Figura 29”).



Figura 29- Sistema de extracción de agua del prototipo.

4.1.2 Dimensiones y peso.

Las dimensiones elegidas para nuestro prototipo son fijadas atendiendo a una serie de factores:

- La búsqueda de un dimensionamiento óptimo que permita la evaporación del agua contenida en el alperujo de una manera constante.
- Facilidad para su transporte.
- Presupuesto disponible.

A continuación, en la “Figura 30” y “Figura 31” se muestra un modelo 3D del prototipo. El detalle dimensional queda reflejado en el anexo VI “Planos” (Diseño final). Los planos han sido proporcionados por la empresa constructora “EXNI S.L” y reflejan las dimensiones exactas y originales del prototipo.

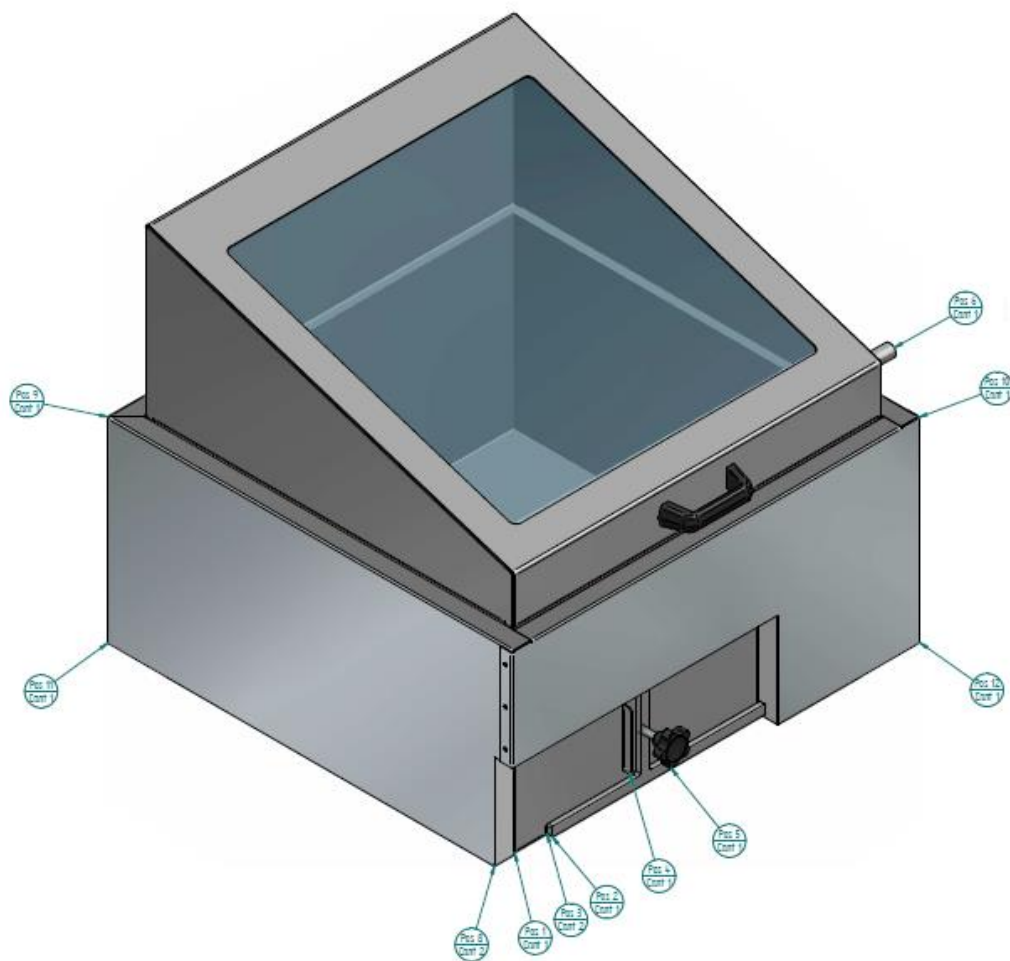


Figura 30 – Modelo 3D prototipo final.

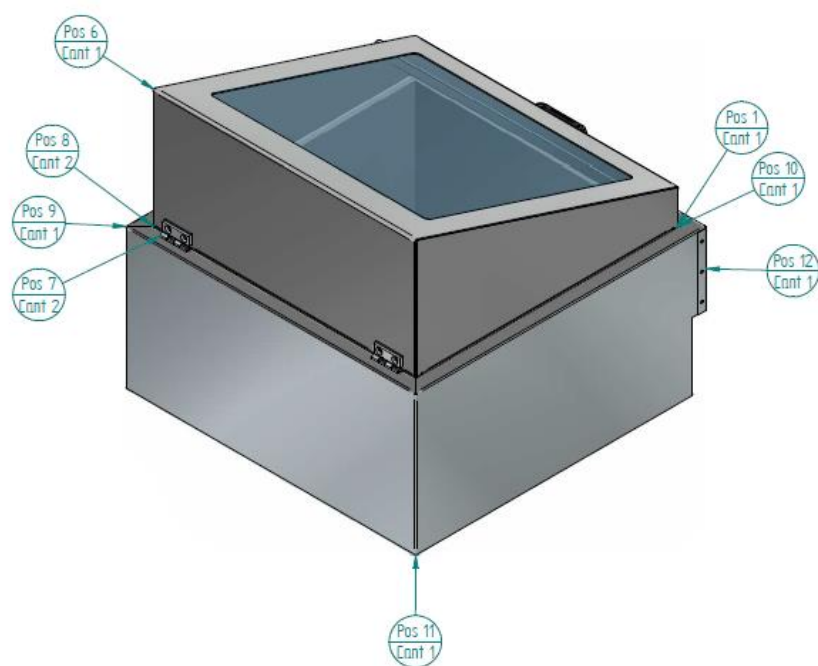


Figura 31 - Modelo 3D prototipo final.

4.2 Caracterización de la biomasa empleada.

4.2.1 Alperujo.

El Alperujo utilizado en nuestro estudio es proporcionado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Campus Científico Tecnológico de Linares (Universidad de Jaén).

Para saber con qué residuo trabajaremos, realizaremos un estudio tanto químico como analítico, que determine las propiedades energéticas de este.



Figura 32 - Alperujo utilizado.

4.2.1.1 Humedad.

Como ya hemos mencionado anteriormente, una de las principales problemáticas que posee el alperujo es su alto contenido en humedad, en torno a un 70%. Sin embargo, realizaremos un análisis experimental para determinar la humedad exacta del residuo con el que trabajaremos.

El cálculo de la humedad del alperujo se ha realizado sometiendo 3 muestras del residuo a un proceso de secado en un horno mufla de temperatura regulable ("Figura 33").



Figura 33 - Muestras en horno mufla de temperatura regulable.

Por tanto, se realiza una pesada de las muestras originales antes de llevar a cabo el proceso de secado, y una segunda pesada tras el proceso de secado en horno. La alta temperatura del horno provocará la evaporación del agua contenida en el residuo, por lo que la segunda pesada nos indicará el peso del alperujo totalmente seco.

Es importante destacar, que el horno no deberá estar a una temperatura superior a 85°C, ya que, en caso contrario, se puede provocar la evaporación de otros componentes volátiles de este y con ello obtener un resultado de contenido en humedad erróneo. Para eliminar todo el contenido en agua de nuestro residuo, las muestras deberán permanecer en el horno, siendo pesadas en intervalos de 12 horas hasta lograr dos pesadas iguales de manera consecutiva. El sistema de operación utilizado se lleva a cabo atendiendo a la norma UNE-EN ISO 18134-1:2016, [18].

A través de la "Ecuación 1" que relaciona la muestra original de alperujo con la seca alperujo, podremos obtener el contenido de humedad, [19] :

$$w (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 = \frac{(P_{im} - P_r) - (P_{fm} - P_r)}{(P_{im} - P_r)} \quad (1)$$

Donde:

- W – Contenido en humedad en %.
- w_i – Peso de la muestra húmeda o $P_{im} - P_r$ (Peso de la muestra húmeda más el recipiente, menos el recipiente)
- w_f – Peso de la muestra seca o $P_{fm} - P_r$ (Peso de la muestra húmeda más el recipiente, menos el recipiente).

- Resultados obtenidos:

A continuación, se exponen los resultados del contenido en humedad que posee nuestro alperujo, sin a ver sido sometido a ningún tipo de proceso de secado. Se tomarán tres muestras para obtener distintos valores.

PESADA INICIAL DEL ALPERUJO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	53,133	20,978
Muestra 2	49,256	79,807	30,551
Muestra 3	49,449	87,649	38,2

Tabla 1 – Pesada de la muestra húmeda.

PESADA ALPERUJO TRAS SECADO EN HORNO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	39,552	7,397
Muestra 2	49,256	60,202	10,946
Muestra 3	49,449	63,346	13,897

Tabla 2 – Pesada de la muestra seca en horno.

CALCULO DE LA HUMEDAD (%)	
Muestra 1	64,73925064
Muestra 2	64,17138555
Muestra 3	63,62041885
MEDIA	64,17701835

Tabla 3- Humedad de las muestras.

Podemos determinar por tanto que el contenido en humedad exacto del alperujo con el que trabajaremos durante todo nuestro estudio es de un 64.177%.

A raíz de este valor, el objetivo es someter el alperujo a un proceso de secado en nuestro prototipo, llevando a cabo cada dos días una toma de muestras del alperujo expuesto, para calcular el porcentaje de humedad que va perdiendo el residuo. El proceso de secado se puede dar por finalizado cuando se obtienen dos valores de humedad prácticamente iguales, de manera consecutiva. Tras saber los resultados, podremos obtener una gráfica que evalúe el porcentaje de humedad perdido en relación a los días de exposición a la radiación solar.

El principal objetivo será que el 64.177% de humedad, tras ser sometido a este proceso, quede reducido hasta un 40% aproximadamente, ya que este último valor de humedad es óptimo para el aprovechamiento del residuo como combustible en calderas.

4.2.1.2 Análisis elemental para cálculo de composición CHNS.

Para la caracterización del residuo se llevará a cabo un análisis químico próximo (*Proximate analysis*) y elemental (*Ultimate analysis*) que nos indicará el contenido (medido en porcentaje de peso en base seca) de material volátil (VM), carbón fijo (FC) y cenizas (*Ash*), y contenido en carbono (%C), hidrógeno (%H), nitrógeno (%N), oxígeno (%O) y azufre (%S) respectivamente.

Los resultados serán comparados con los obtenidos en otras publicaciones [20], salvo en el caso del análisis próximo, que como no disponemos de material para llevarlo a cabo, será obtenido directamente de estas, para tener una referencia ("Tabla 4").

Para el análisis elemental, se estudiarán dos muestras y ha sido realizado por los servicios técnicos propios de la Universidad de Jaén ("Tabla 5" y "Tabla 6").

Resultados obtenidos:

Análisis Químico próximo (%peso)			
Alperujo / Olive cake [17]	VM	FC	Ash
	62,1	34,6	2,8

Tabla 4 - Análisis Próximo (referencia bibliográfica).

Análisis Químico elemental (%peso)					
Alperujo / Olive cake [17]	C	H	N	O	S
	53,7	6,7	0,6	36,2	<0,1

Tabla 5 - Análisis Elemental (referencia bibliográfica).

Análisis Químico elemental (%peso)					
	C	H	N	O	S
Muestra 1	44,005	6,426	1,2036	48,2404	0,1251
Muestra 2	43,9213	6,4352	1,2559	48,3092	0,0784

Tabla 6 - Análisis Elemental servicios técnicos Universidad de Jaén sobre alperujo utilizado.

Estos resultados son obtenidos al analizar muestras totalmente secas, es decir, cuando su contenido de humedad es 0%. Uno de los objetivos finales de este estudio, consiste en la representación gráfica del aumento del PCI de nuestro combustible, en relación a la humedad que este va perdiendo a lo largo del proceso de secado. Dependiendo del contenido en humedad con el que trabajemos, la composición elemental del residuo variara, por lo que deberemos de recalcular estos valores, en base a los obtenidos para la muestra seca.

4.2.1.3 Poderes caloríficos (PCI y PCS).

El cálculo del PCS (Poder calorífico superior), se llevará a cabo en una bomba calorimétrica, en la que se han realizado varias pruebas. La bomba calorimétrica utilizada, se puede observar en la "Figura 34".



Figura 34 - Bomba calorimétrica empleada.

El principio de funcionamiento de las bombas calorimétricas se basa en quemar una cierta cantidad de combustible y medir la cantidad de calor producida, a través de la energía térmica ganada por un líquido conocido (agua).

El valor de PCS se calcula para una muestra totalmente seca (0% humedad), mientras que el PCI, será calculado mediante la fórmula de Dulong, que será desarrollada en los próximos apartados.

Conociendo el valor de la humedad inicial de la muestra y, monitorizando la evolución de la pérdida de peso correspondiente a la evaporación del agua, podemos obtener los datos de la humedad del alperujo a lo largo del tiempo.

El valor del PCS que obtenemos en el laboratorio para nuestro alperujo es de 4.616,61 kcal/kg. Se llevan a cabo tres ensayos, realizados en los servicios técnicos del Campus científico tecnológico de Linares. A continuación, se reflejan los resultados del PCS obtenidos ("Tabla 7"):

	PCS
Muestra 1	4479,1016
Muestra 2	4589,92
Muestra 3	4780,81
Media	4616,610533

Tabla 7 – Resultados PCS



Figura 35 – Ejemplo valores PCS en bomba calorimétrica. Servicios técnicos Campus científico tecnológico de Linares.

Una vez calculado el PCS, se pretende que, a partir de la medición de la pérdida de humedad con respecto a los días de secado transcurrido, se calcule el PCI, para obtener una nueva grafica que relacione el crecimiento del PCI del residuo con respecto al tiempo de secado.

El cálculo del PCI puede llevarse a cabo, utilizando alguna de las siguientes expresiones:

1) La "Ecuación 2", en la que este queda relacionado con el PCS, la humedad y el contenido en hidrogeno de la muestra. Siendo L_v el calor latente de vaporización del agua (2260 KJ/kg). [21]

$$PCI = PCS - L_v \cdot \left(\frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \quad (2)$$

2) La "Ecuación 3", conocida como la fórmula de Dulong, con la que podemos obtener el PCI a partir de las proporciones, en peso, del carbono total, hidrógeno útil, azufre y humedad del combustible: [22]

$$PCI = 8140 + C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 S - 600 \cdot H_2O \quad (3)$$

Ya que disponemos de los resultados del análisis CHNS, utilizaremos esta última; por lo que se deberá de llevar a cabo un ajuste de proporciones en peso de cada componente en función del contenido en humedad, partiendo como base de los resultados obtenidos para una muestra totalmente seca.

4.2.1.4 Diferencias energéticas con otros combustibles.

La búsqueda de un proceso de secado del alperujo, radica en el alto valor energético, que posee este residuo, una vez perdido su contenido en humedad. Formándose orujillo, subproducto que se produce en las extractoras como resultado del proceso de secado y extracción de aceite de orujo graso, es decir, es la porción resultante de la eliminación del agua y el aceite del alperujo. Con un porcentaje de humedad de aproximadamente un 10% y un poder calorífico en torno a 3780 kcal/kg en base seca, lo que le confiere un elevado valor como combustible. En la "Figura 36" podemos observar el resultado tras el secado del alperujo, [23].



Figura 36 - Alperujo totalmente seco.

Para hacernos una idea del valor de nuestro residuo como combustible vamos a exponer una tabla comparadora ("Tabla 8") entre este, y el resto de residuos habitualmente utilizados, [24],[25].

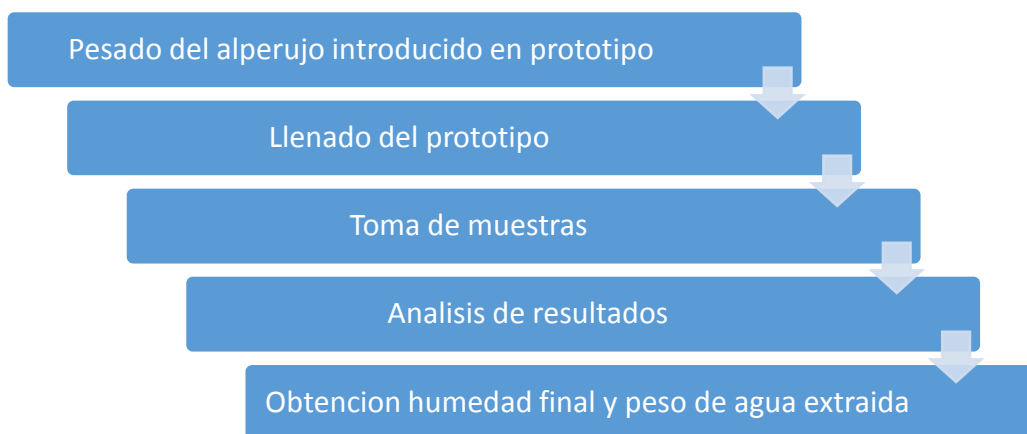
	Humedad (%)	PCI (kcal/kg)
Alperujo	70	2.018
Orujillo	10,05	3.780
Hueso de Aceituna	13	3.860
Hollín	37,46	2.360
Astilla	<20	3.608
Pellet	-	3.940
Madera	-	3.689
Carbón (Antracita)	-	5.829

Tabla 8 - Diferencias energéticas entre combustibles

Como podemos observar el orujillo tiene uno de los valores de PCI mas altos, además una campaña media genera unas 684.000 t/año de orujillo. Esto lo convierte en un residuo con alto valor de revalorización, [23].

4.3 Procedimiento de ensayo.

El procedimiento de secado llevado a cabo en la práctica, se puede dividir en las siguientes etapas:



4.3.1 *Pesado del alperujo que se introducirá en el prototipo.*

Para este primer punto, se ha de tener en cuenta que la cantidad introducida, deberá ser suficiente, como para que se produzca la extracción de agua de manera eficiente. Se han llevado a cabo tres ensayos en diferentes condiciones climatológicas, el primer y segundo ensayo fueron realizados en invierno, mientras que el tercero ha sido realizado en primavera. Este último se lleva a cabo, para comprobar el rendimiento del prototipo a altas temperaturas, por lo que, lograremos reducir mucho más la humedad de nuestro residuo, pero no muestra resultados representativos, ya que no estamos sometidos a condiciones de trabajo normalizadas.

Para el primer se utilizaron un total de 10 kg de alperujo, mientras que, para el segundo ensayo se utilizaron 11.28 kg y para el tercer ensayo 12kg.



Figura 37 – Pesado del alperujo a introducir en prototipo. (Primer ensayo)

4.3.2 Llenado del prototipo.

Una vez hemos pesado el alperujo que vamos a introducir en el prototipo, se procede al llenado de este, el alperujo deberá de ser extendido en la base del prototipo de manera uniforme y ser removido previamente, para evitar las acumulaciones de agua.



Figura 38 - Extensión del alperujo en prototipo.

4.3.3 Toma de muestras.

Una vez se introduce el alperujo en el interior del prototipo, comienza el proceso de secado, al cual estará expuesto durante un total de 10 días.

A partir de este punto, como nuestro prototipo final no dispone del sistema de sensorización para el cálculo del porcentaje de humedad perdido, que se había planteado, se deberá de llevar a cabo una toma de muestras cada 2 días (se recogerán 3 muestras cada 2 días). Estas muestras deberán de ser pesadas, posteriormente ser sometidas al secado en horno mufla, volver a pesarlas tras el secado en horno, y finalmente mediante la pérdida de peso, calcular el porcentaje de humedad perdido tras dos días.

Los resultados serán anotados, y una vez terminado el proceso de secado llevaremos a cabo una gráfica que represente la pérdida de humedad con respecto a los días de exposición.

4.3.4 Análisis de resultados obtenidos.

Tras 48 horas de secado, se lleva a cabo un análisis inicial de resultados, para comprobar el porcentaje de pérdida de humedad. Como hemos calculado anteriormente el porcentaje de humedad de nuestro alperujo es de 64.178%. Tras 48 horas el porcentaje de humedad se puede comprobar a continuación ("Tabla 9, 10 y 11")

PESADA TRAS 2 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	52,188	20,033
Muestra 2	49,256	72,786	23,53
Muestra 3	49,449	75,433	25,984

Tabla 9 - Peso de las muestras de alperujo tras secado en prototipo durante 48 horas.

PESADA EN HORNO TRAS 2 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	40,294	8,139
Muestra 2	49,256	58,736	9,48
Muestra 3	49,449	59,869	10,42

Tabla 10 - Peso de las muestras de alperujo (48 horas de secado) tras secado en horno.

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	59,37203614
Muestra 2	59,71100722
Muestra 3	59,89839901
MEDIA	59,66048079

Tabla 11 - Humedad de las muestras.

Como podemos comprobar, tras dos días de secado en el prototipo, el alperujo ha pasado de contener un 64.178% de humedad a un 59.660%. Se puede decir que ha perdido aproximadamente un 5% de humedad. En la "Figura 39", podemos comprobar el agua extraída tras 2 días de secado, que equivaldría a este 5% de humedad perdida.



Figura 39 - Agua extraída tras dos días de secado.

Sin embargo, cuando se abre el prototipo tras dos días para realizar la toma de muestras se comprueba que, en las partes más superficiales, debido a la estratificación formada en el residuo durante el proceso de secado, el aceite que este contiene (el cual supone un 5% en peso) se sitúa en las zonas más superficiales como consecuencia de su menor densidad con respecto al resto de componentes.

Este fenómeno provoca que, en la parte superficial, el aceite actué como capa impermeable, lo que impide la evaporación correcta del agua situada en las capas más inferiores. Esta situación, retrasa de manera considerable todo el proceso de secado, por lo que se debe idear un mecanismo de agitación, para evitar la acumulación de aceite en las capas superiores. Podemos observar la estratificación formada en la "Figura 40".



Figura 40 - Estratificación formada durante el proceso de secado.

Como no disponemos de tiempo ni presupuesto para idear un mecanismo de agitación automático, puesto que esta es una fase inicial del proyecto, se procederá al agitado manual en intervalos de aproximadamente 1 hora. Este proceso implica la apertura de la parte superior del prototipo, para llevar a cabo la agitación, por lo que el proceso se verá afectado por una serie de desventajas:

- 1) Se producirá una reducción considerable de la temperatura interior, retrasando el proceso de secado.

2) Reducción de la cantidad de agua extraída. Al abrir la parte superior, el vapor de agua que todavía no ha logrado condensarse se pone en contacto con el exterior, perdiéndose al entrar en contacto con la atmosfera. Como resultado se sigue perdiendo humedad, pero se reduce la cantidad de agua extraída.

Dicho esto, los siguientes ensayos se han realizado teniendo muy presente este factor. De manera que el residuo será agitado diariamente durante todo el proceso de secado para comprobar la importancia que supondría idear un sistema de agitación en trabajos futuros.

A continuación, se muestran los resultados tras dos días de secado de una muestra de alperujo extraída del prototipo cuyo contenido en humedad tiene un valor de 44.51%. Sin embargo, esta vez los resultados reflejan la perdida de humedad producida, cuando llevamos a cabo el proceso de agitación del residuo en intervalos de 1 hora. ("Tablas 12,13 y 14").

PESADA DE MUESTRAS TRAS DOS DIAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	49,274	17,119
Muestra 2	49,256	77,487	28,231
Muestra 3	49,449	82,214	32,765

Tabla 12 - Pesada de muestras tras dos días de secado en prototipo.

PESADA DE MUESTRAS TRAS SECADO EN HORNO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	43,047	10,892
Muestra 2	49,256	69,075	19,819
Muestra 3	49,449	69,981	20,532

Tabla 13 - Pesada de muestras tras secado en el horno.

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	36,37478825
Muestra 2	29,79703163
Muestra 3	37,33557149
MEDIA	34,50246379

Tabla 14 - Calculo de humedad tras dos días de secado en prototipo.

Como se observa en la "Tabla 14", esta vez hemos pasado de un 44.51% de humedad a un 34.50%, lo que supone una pérdida del 10.01% de humedad (el doble con respecto a la perdida sin proceso de agitación). Llegados a este punto podemos

comprobar la importancia de idear un mecanismo de agitación en trabajos futuros, ya que esto, evita la estratificación del residuo y por tanto la acumulación de aceite en las capas superiores, provocando así un proceso de secado más rápido y eficiente.

4.3.5 Humedad final obtenida y pesado del agua total extraída.

Tras el proceso de secado del alperujo durante 10 días, logramos reducir el contenido de humedad desde un 64.178% hasta un 40,804 %, en el caso del primer ensayo realizado. Este porcentaje podemos considerarlo un resultado más que optimo, ya que actualmente numerosas calderas y gasificadores trabajan con combustibles de humedad similar.

Para el segundo ensayo, se utiliza una nueva remesa de alperujo, cuyo contenido inicial en humedad es del 67%. Tras el proceso de secado, logramos que este quede reducido hasta un 39.901%, unos valores, que pese a ser muy parecidos a los resultados obtenidos en el primer ensayo, consideraremos que son más representativos, ya que en este segundo ensayo se ha llevado a cabo el proceso de agitación manual ya mencionado anteriormente.

Por último, en el tercer ensayo, llevado a cabo al inicio de la primavera, con una media de 35°C diarios, se ensayan 12kg, logrando reducir la humedad de un 64.178%, hasta un 10.665%. Con estos resultados, podemos comprobar la enorme eficacia que puede llegar a tener nuestro prototipo, sin embargo, no consideramos estos valores representativos, ya que normalmente el alperujo se produce durante los meses de recogida de aceituna (principalmente entre noviembre y febrero-marzo).

Tras finalizar el proceso de secado se comprueba el agua total que hemos conseguido extraer del alperujo ensayado, obteniendo como resultado un total de 2.6 litros de agua para el primer ensayo, 2.4 litros para el segundo y 3.28 litros para el tercero. Lo que representa un porcentaje en peso respecto al total de muestra ensayada del 26%, 24% y 27.33% respectivamente para cada ensayo.

El agua extraída, se trata de agua destilada totalmente limpia y utilizable para cualquier proceso, siendo la extracción de esta uno de los beneficios principales del secado por condensación.

5 RESULTADOS Y DISCUSIONES.

En este apartado se expondrá una tabla resumen de los resultados obtenidos respecto a la humedad y al PCI para cada uno de los ensayos realizados.

Los cálculos que se han llevado a cabo para obtener estos resultados, pueden observarse en los anexos I, II y III.

5.1 Ensayo 1. (Cálculos reflejados en Anexo I).

TABLA RESUMEN		
DIAS EXP.	Humedad	PCI (kJ/kg)
0	64,177	3928,2501
2	59,6604	4626,100
4	54,2844	5457,9536
6	47,02	6581,2557
8	45,7526	6777,2352
10	40,804	7542,4426

Tabla 15 - Tabla resumen resultados obtenidos en ensayo 1.

A partir de estos valores, podemos representar la gráfica de variación de humedad con respecto a los días de exposición (Gráfica 1), así como la gráfica del incremento del PCI del residuo con respecto a los días de exposición (Gráfica 2):

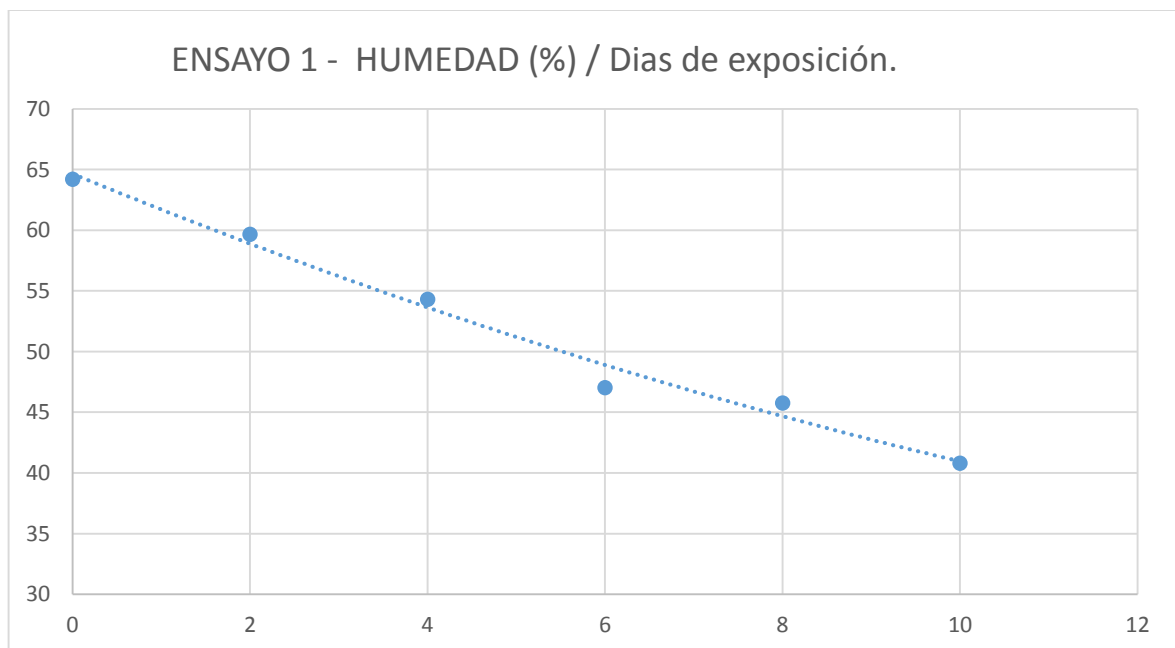


Gráfico 1 - Variación de humedad con respecto a los días de exposición.

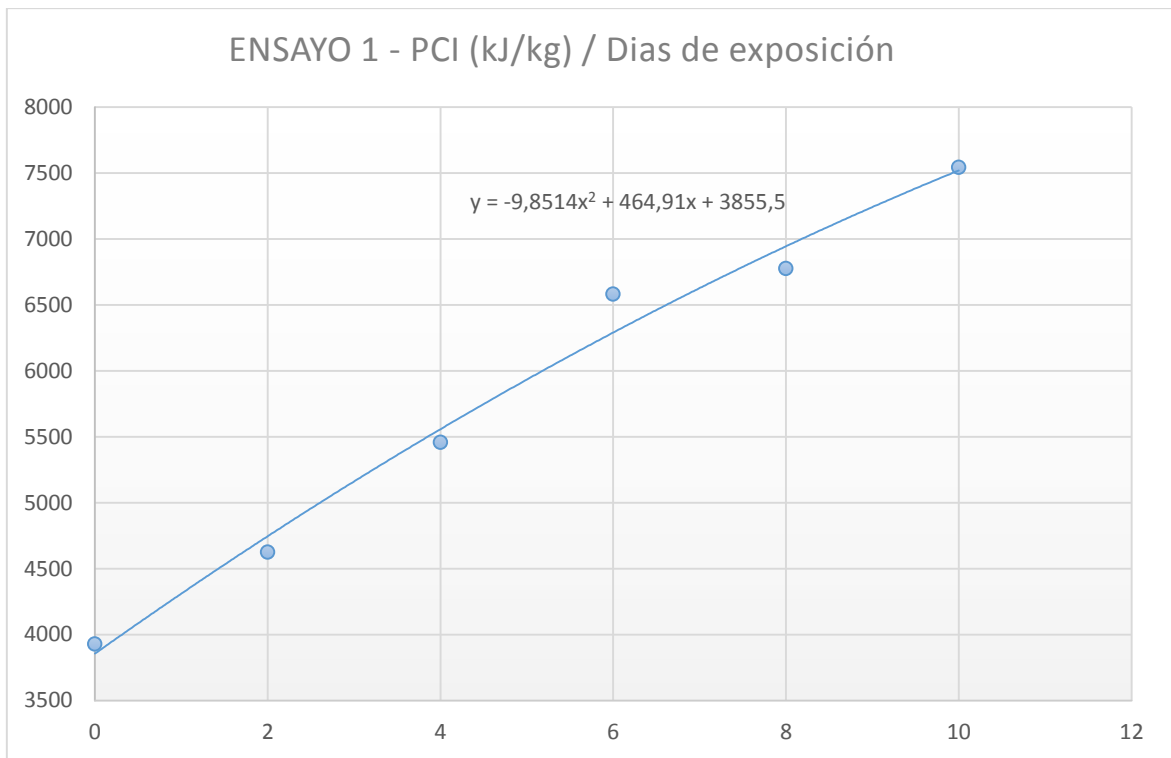


Gráfico 2 - Incremento de PCI del residuo con respecto a los días de exposición.

5.2 Ensayo 2. (Cálculos reflejados en Anexo II).

TABLA RESUMEN		
DIAS EXP.	Humedad	PCI (kJ/kg)
0	67	3491,7265
2	60,5366	4491,169
4	53,1854	5627,8932
6	43,8933	7064,7407
8	41,317	7463,1168
10	39,901	7682,0744

Tabla 16 - Tabla resumen resultados obtenidos en ensayo 2

De igual manera que en el ensayo 1, se representa la gráfica de variación de humedad con respecto a los días de exposición (Gráfica 3), así como la gráfica del incremento del PCI del residuo con respecto a los días de exposición (Gráfica 4):

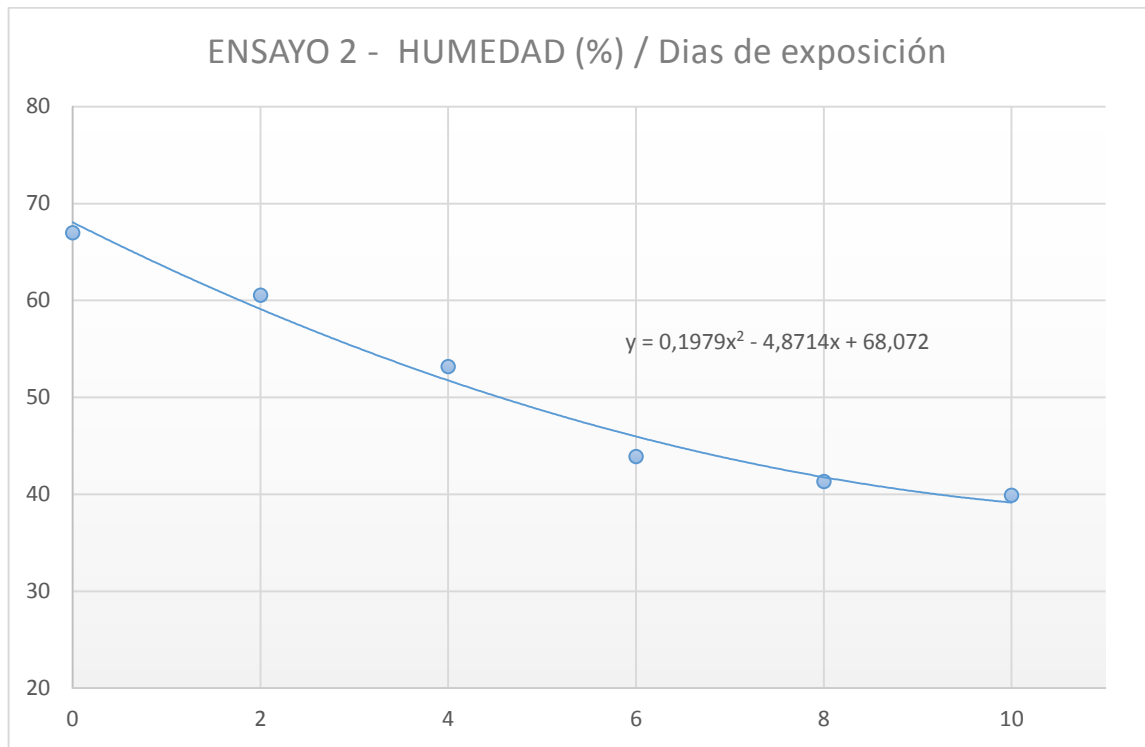


Gráfico 3 - Variación de humedad con respecto a los días de exposición.

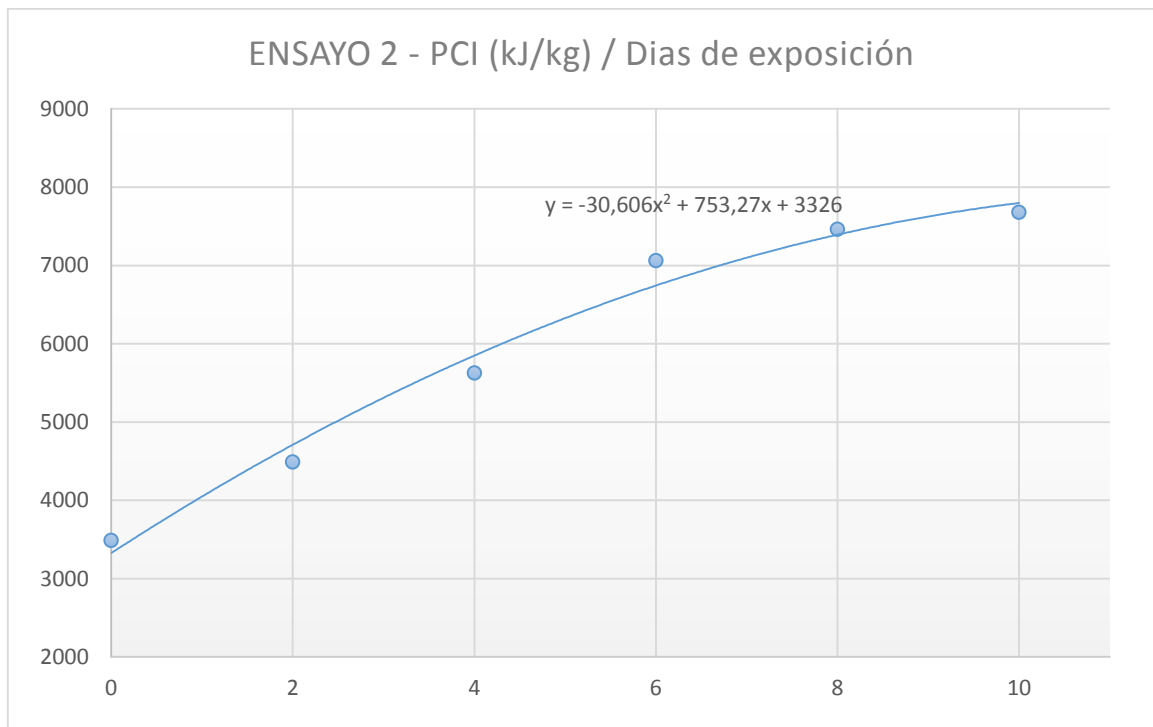


Gráfico 4 - Incremento de PCI del residuo con respecto a los días de exposición.

5.3 Ensayo 3. (Cálculos reflejados en Anexo III).

TABLA RESUMEN		
DIAS EXP.	Humedad	PCI (kJ/kg)
0	64,177	3928,2501
2	59,4918	4652,7277
4	51,5117	5886,6992
6	44,5109	6969,2406
8	34,5624	8516,8659
10	10,6651	12202,869

Tabla 17 - Tabla resumen resultados obtenidos en ensayo 3

Nuevamente se representan las gráficas explicadas en los ensayos 1 y 2.

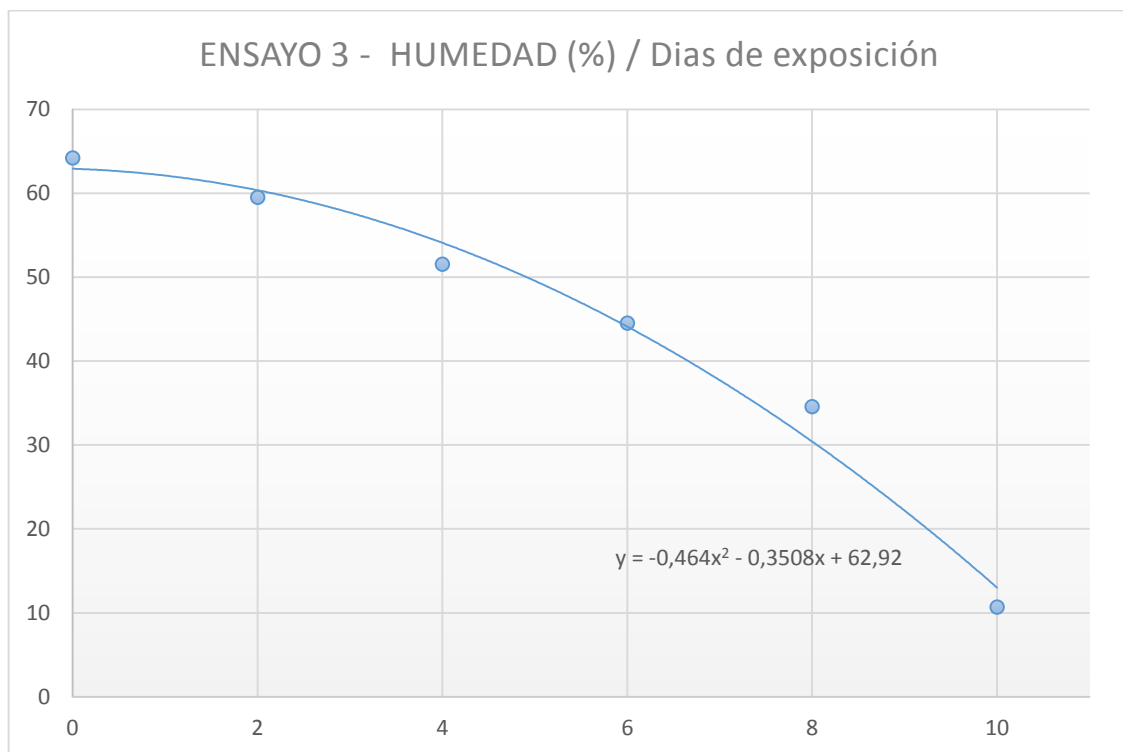


Gráfico 5 - Variación de humedad con respecto a los días de exposición.

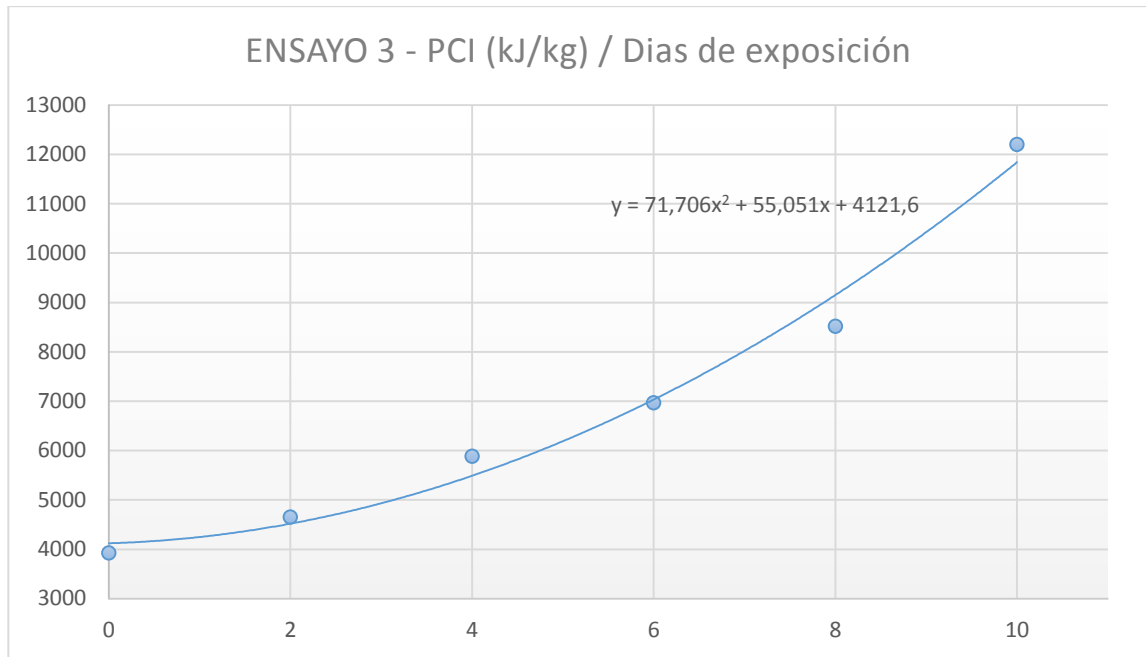


Gráfico 6 - Incremento de PCI del residuo con respecto a los días de exposición.

Como hemos mencionado en apartados anteriores, las gráficas de este último ensayo no resultan representativas ya que el análisis se ha llevado a cabo en días extremadamente calurosos (mes de julio). Siendo lo normal que el proceso se lleve a cabo en los meses de noviembre a marzo, ya que es la época de recogida de la aceituna.

Llegados a este punto, resulta interesante llevar a cabo el cálculo del rendimiento de secado para obtener un valor medio de la eficacia capaz de alcanzar el nuestro prototipo.

El cálculo del rendimiento se lleva a cabo a partir de la siguiente expresión, [26]:

$$\eta = \frac{h_v \cdot P_{muestra} \cdot \frac{(m_o - m_F)}{100}}{E_{solar} \cdot \alpha_s \cdot S_{secador}} \quad (4)$$

Donde:

- η - Rendimiento de secado.
- h_v - Calor latente vaporización del agua, equivalente a 2260 kJ/kg.
- $P_{muestra}$ - Peso de la muestra ensayada.
- m_o - Porcentaje inicial de humedad contenida en la muestra.
- m_F - Porcentaje final de humedad contenida en la muestra.
- E_{solar} - Irradiación solar recibida durante el proceso de secado.
- α_s - Coeficiente de absorción del vidrio.
- $S_{secador}$ - Superficie del secador.

El cálculo del rendimiento se realiza para cada uno de los días de exposición a la radiación solar durante todo el proceso de secado. Para ello es necesario saber el valor de la irradiancia media producida durante los días de secado. Este valor, podemos obtenerlo del centro de datos de radiación solar facilitado por la Agencia Andaluza de la Energía, [27]. Los días de comienzo de cada ensayo fueron el 5 de abril de 2017, el 3 de mayo de 2017 y el 19 de mayo de 2017.

El coeficiente de absorción del vidrio, obtendrá un valor igual a 0.88, según se ha podido estudiar en otras publicaciones,[28] .

A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados de rendimiento obtenidos ("Tabla "). Los cálculos realizados quedan reflejados en Anexo IV.

	EFICIENCIA (%)
Ensayo 1	8,078
Ensayo 2	12,099
Ensayo 3	11,323

Tabla 18 – Eficiencia de secado en ensayos.

6 MEJORAS DE DISEÑO Y TRABAJO.

Durante todo el periodo de tiempo en que se ha llevado a cabo este estudio, se han adoptado algunas mejoras de trabajo, buscando una mayor eficiencia, así como la disminución del tiempo de secado.

Algunas de las mejoras ideadas son las que se muestran a continuación.

1) Aplicación de líquidos hidrofóbicos en la superficie interior del vidrio.

Cuando el vapor de agua toma contacto con el vidrio que forma el techo del prototipo, el vapor de agua se condensa, y las gotas de agua formadas se deslizan por el vidrio inclinado hasta llegar a la canaleta que comunica con el depósito donde se irá acumulando el agua. Para mejorar el deslizamiento de este agua sobre el vidrio, y por tanto, que la extracción de agua se lleve de manera más rápida, se idea la aplicación de un líquido hidrofóbico sobre su superficie. El líquido que se utilizará se trata de un repelente para lluvia, similar al que se utiliza en las lunas de los vehículos para facilitar la evacuación de agua. La función del líquido es la creación de una capa antiadherente y deslizante sobre la que las gotas de lluvia resbalan fácilmente. El líquido utilizado es el que podemos observar en la "Figura 41".



Figura 41 - Líquido repelente de lluvia.

Al aplicar este producto sobre la superficie del vidrio del prototipo, comprobamos que los resultados son los esperados, formándose una superficie antiadherente, que provoca que todo el vapor de agua condensado se deslice rápidamente a la canaleta extractora de agua. Previamente a la aplicación del producto la superficie debe de ser limpiada para que el líquido actúe correctamente.

A continuación, se puede apreciar la diferencia de formación de agua condensada sobre el cristal cuando no utilizamos el líquido hidrofóbico ("Figura 42"), con respecto a cuándo si es utilizado ("Figura 43").



Figura 42 – Condensación de agua sobre cristal sin uso de líquido hidrofóbico.



Figura 43 - Condensación de agua sobre cristal utilizando líquido hidrofóbico.

2) Fabricación de una plataforma tamizadora para extracción de aceite.

Al someter el alperujo al proceso de secado, observamos que, tras varios días de secado, en algunas zonas se producen acumulaciones de aceite. Este aceite está constantemente mezclado con el residuo, y una vez que el alperujo es secado se puede someter a un proceso de extracción para separar este aceite.

Sin embargo, se llega a la conclusión, de la posibilidad de separar cierta fracción de este aceite, si el residuo fuese colocado en una plataforma cuya superficie este formada por un tamiz, en lugar de ir colocado directamente sobre la base del prototipo. De esta manera, las acumulaciones de aceite que hemos mencionado podrían pasar por el cernido del tamiz quedando separado el aceite, del alperujo.

Para comprobar la eficacia de este planteamiento, y si verdaderamente se conseguiría la separación del aceite, se procede a la fabricación de una plataforma, la longitud y anchura de esta serán equivalentes a las del prototipo (guardando 1 cm de margen tanto en longitud como en ancho para que podamos introducirla en el interior del prototipo), por otro lado, la altura será de 10cm.

Como superficie se requiere una rejilla con una luz de malla de 2mm. Para ello, como no se encuentra un material acorde a estas especificaciones, se utilizan dos rejillas con luz de malla igual a 5 mm superpuestas, una de aluminio y otra de acero, para lograr la luz de malla deseada, tal y como se muestra en la "Figura 44".



Figura 44 - Rejillas empleadas como superficie de plataforma.

Estas rejillas serán las que actuarán como tamiz, para lograr la separación del aceite.

Los soportes que utilizaremos para sostener el tamiz serán tornillos de acero anclados a la rejilla por medio de tuercas palometa. La caracterización de los materiales utilizados se muestra en la "Tabla 19".

Cantidad	Concepto
9	Tornillo DIN931 M8x100
9	Tuerca M8 DIN934 ZINCADA
18	Arandela M10 DIN125 ZINCADA
4	Tuerca palometa M8 DIN315 ZINCADA
5	Tuerca ciega M8 INOX A2 DIN1587

Tabla 19 - Materiales plataforma.

El resultado final obtenido es el que se muestra a continuación (Figura 45, Figura 46 y Figura 47):

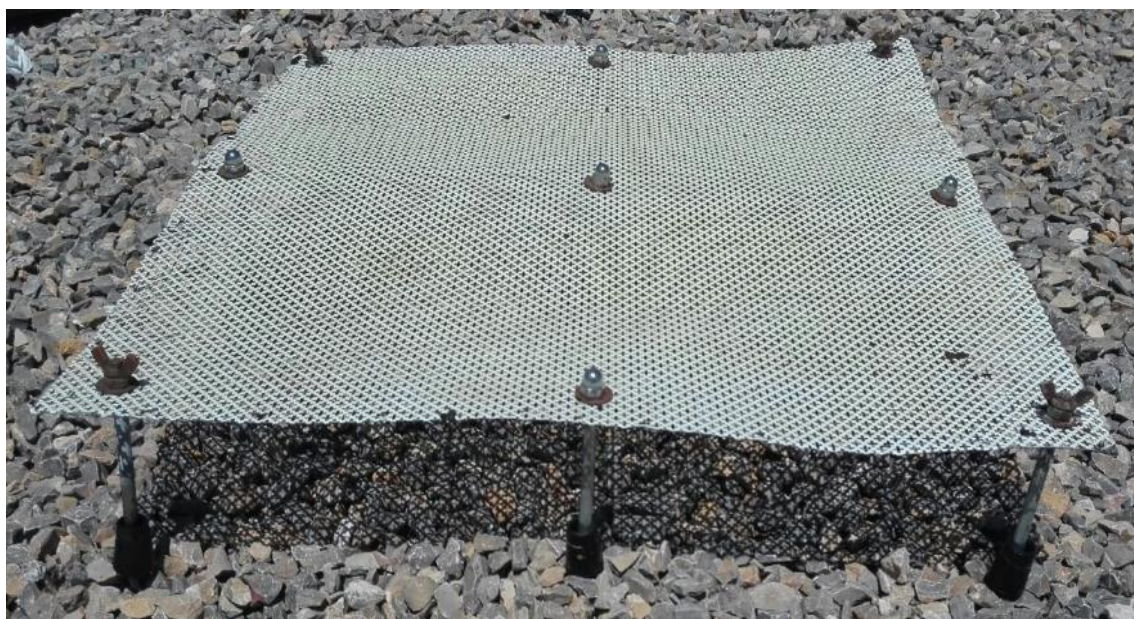


Figura 45 - Diseño tamiz utilizado 1

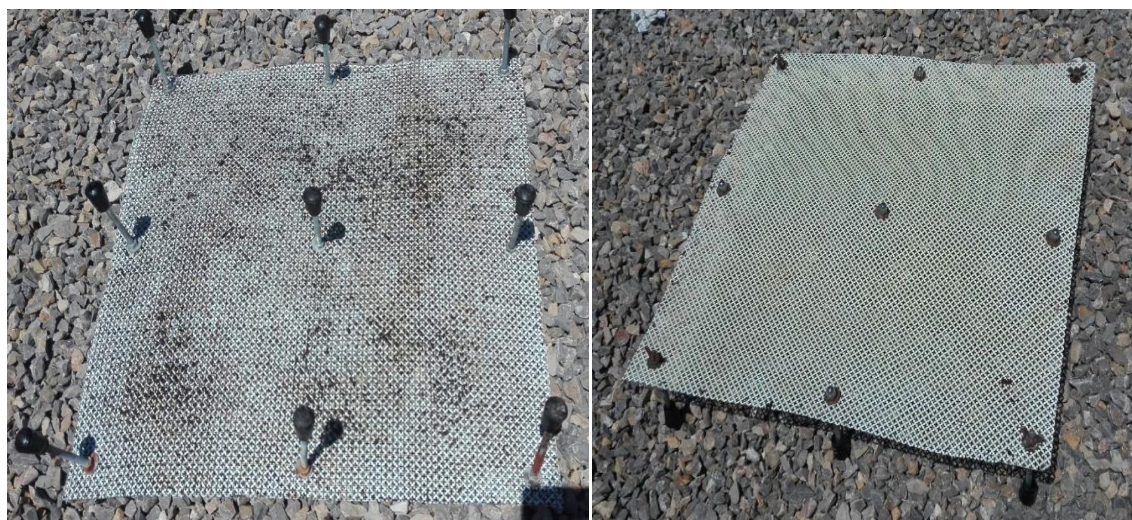


Figura 46- Diseño tamiz utilizado 2

Figura 47 - Diseño tamiz utilizado 3

Una vez llevada a cabo la construcción, se procede a la comprobación del efecto que causara, para ello se someten al proceso de secado estudiado, 12 kg de alperujo, para tras concurrir el periodo de 10 días de secado, se comprueben los resultados obtenidos.

La preparación del tamiz en el prototipo se puede observar a continuación (Figura 48, Figura 49 y Figura 50):

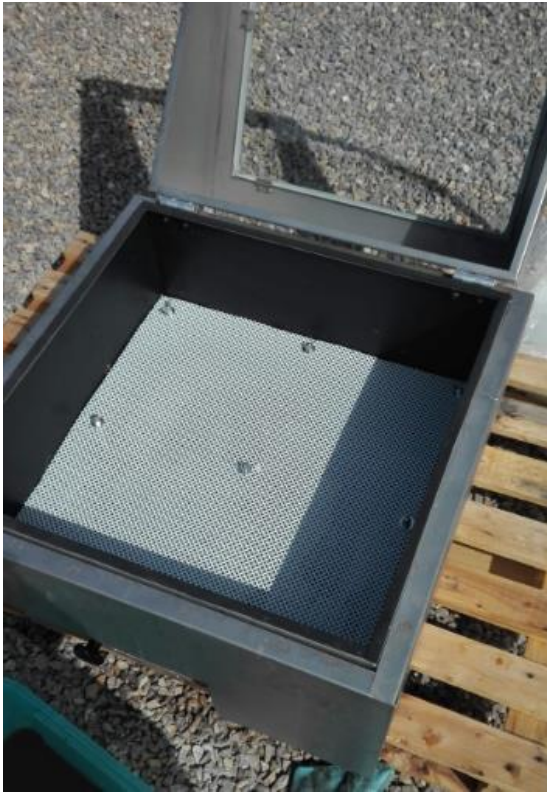


Figura 49 - Inserción de tamiz en prototipo



Figura 48 - Extendido de alperujo sobre tamiz.



Figura 50 - Resultado alperujo sobre tamiz. (Vista desde la compuerta exterior del prototipo).

Tras concurrir el proceso de secado, se extrae el alperujo y comprobamos si hemos logrado extraer aceite, los resultados se pueden observar a continuación ("Figura 51"):



Figura 51 - Aceite retenido en el prototipo.

Comprobamos, que se ha logrado extraer satisfactoriamente, consiguiendo extraer un total de 0.95 litros de aceite ("Figura 52'), este aceite lo someteremos a 80°C en el horno mufla, para que la posible agua que pueda contener se evapore ("Figura 53').



Figura 52 - Aceite extraído

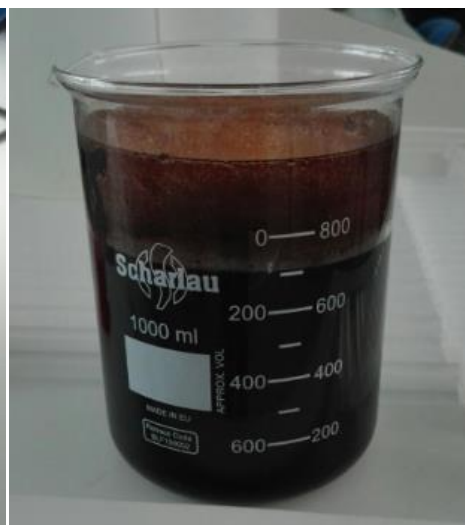


Figura 53 - Aceite sometido a horno

Finalmente, obtenemos 0.7 kg de aceite, sabiendo que la densidad del aceite es igual a 0.92 kg/l, podemos determinar que se han extraído un total de 0.76 l.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

La principal conclusión que podemos señalar tras realizar este estudio, es que el secador solar de alperujo propuesto lleva a cabo la labor de secado de manera eficiente y supone un sistema limpio, económico, robusto y fácil de fabricar, que puede ser utilizado como alternativa al secado tradicional de residuos biomásicos, pudiendo utilizar además de alperujo, cualquier otro tipo de combustible o residuo, por ejemplo, los lodos procedentes del tratamiento de los efluentes de aguas residuales (EDAR).

Además del secado, se ha logrado extraer un gran porcentaje de humedad en forma de agua condensada, por lo que no solo obtenemos un combustible con mayores cualidades energéticas, sino que también obtenemos una fuente adicional de agua destilada, que puede ser destinada para otras operaciones llevadas a cabo en la almazara o bien como sistema de regadío de cultivos.

Por otro lado, las mejoras de trabajo y diseño ideadas, han contribuido a conseguir unos resultados más satisfactorios, así como conseguir un proceso de secado de mayor eficiencia.

Sin embargo, no todo han sido resultados beneficiosos, encontrando el inconveniente técnico de que al trabajar con un residuo con contenido en aceite (5% en peso), es de gran importancia idear un sistema de agitado que mantenga el residuo en constante movimiento, ya que, por lo contrario, la formación de una capa aislante en la parte superior (causada por la menor densidad del aceite con respecto al agua), retrasaría todo el proceso de secado.

Como solución, a continuación, se proponen algunas alternativas utilizadas en otros procesos industriales pero aplicables a nuestro prototipo. Se exponen como planteamiento para trabajos futuros, en caso de llevar a cabo la patente del prototipo estudiado:

- ***Sistema de agitación mediante topo eléctrico:***

Consiste en un sistema utilizado para el secado y tratado de lodos, su función es remover, mezclar y airear los lodos para un mejor secado al sol.

El sistema es totalmente autónomo y utiliza sensores ultrasonido para desplazarse en el interior de la habitación donde se desarrolla el proceso de secado. Para remover el lodo, utiliza unas palas, ubicadas debajo de él. Su accionamiento se lleva a cabo por energía solar fotovoltaica. [29]

El funcionamiento es controlado de forma totalmente automática a través del sistema de regulación y mando de la planta de secado solar.

El Topo Eléctrico realiza todo el trabajo con un consumo de energía de apenas 10 kWh/d, convirtiéndose en un sistema económico y cómodo (ya que puede ser extraído en cualquier momento).



Figura 54 - Topo eléctrico desarrollado por Thermo-System.[22]

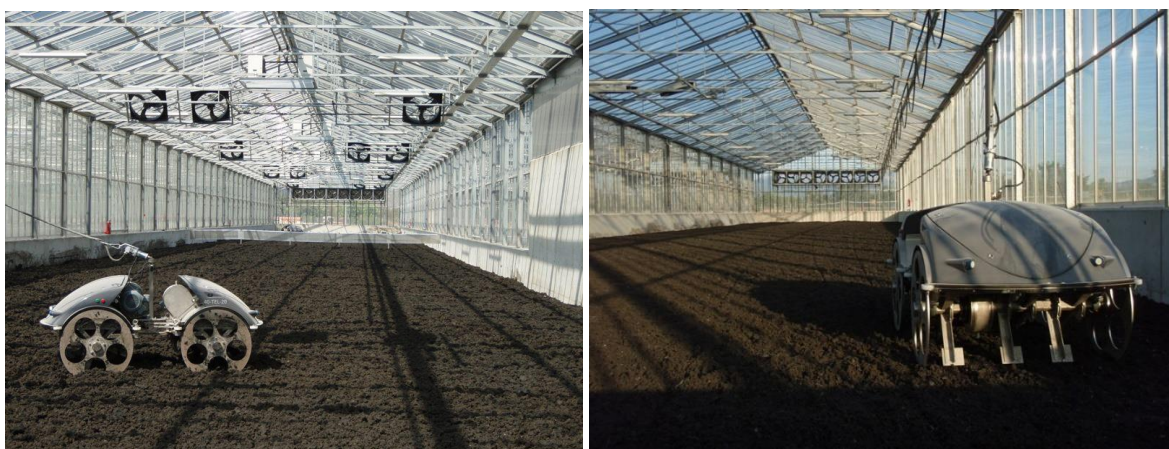


Figura 55 – Topo eléctrico aplicado a lodos procedentes de EDAR

- **Gestor de lodos.**

Este sistema, tiene la misma funcionalidad que el topo eléctrico, además es ideado por la misma empresa. Sin embargo, a diferencia de este, puede transportar el lodo en cualquier dirección longitudinal y transversal, y por tanto tener un funcionamiento continuo desde los puntos de carga y descarga que se deseen. Este sistema se puede observar en la "Figura 56" y "Figura 57". [30]

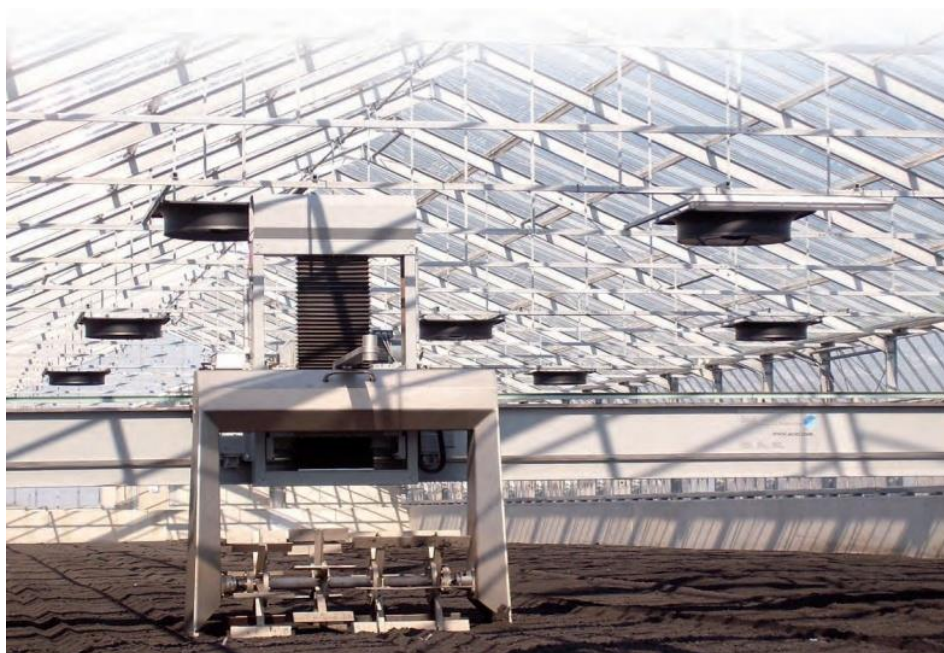


Figura 56 - Gestor de lodos desarrollado por Thermo-System.[23]



Figura 57 - Mecanismo de agitación del gestor de lodos.[23]

8 ANEXOS.

8.1 ANEXO I. Resultados humedad y obtención del PCI para el primer ensayo. Hoja de cálculo.

Tabla de Contenido:

- Pesos de las muestras recogidas.
- Pesos de las muestras recogidas tras secado en horno.
- Cálculo de la humedad.
- Cálculo del análisis CHNS en función del porcentaje de humedad.
- Cálculo del PCI.

8.1.1 Peso de muestras y cálculo de humedad.

El cálculo de la humedad se lleva a cabo con la expresión citada en apartados anteriores:

$$w (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \cdot 100 = \frac{(P_{im} - P_r) - (P_{fm} - P_r)}{(P_{im} - P_r)} \quad (1)$$

Donde:

- W – Contenido en humedad en %.
- w_i – Peso de la muestra húmeda o $P_{im} - P_r$ (Peso de la muestra húmeda más el recipiente, menos el recipiente)
- w_f – Peso de la muestra seca o $P_{fm} - P_r$ (Peso de la muestra húmeda más el recipiente, menos el recipiente).

- Análisis inicial del alperujo antes de ser sometido al proceso de secado:

PESADA INICIAL DEL ALPERUJO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	53,133	20,978
Muestra 2	49,256	79,807	30,551
Muestra 3	49,449	87,649	38,2

PESADA ALPERUJO TRAS SECADO EN HORNO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	39,552	7,397
Muestra 2	49,256	60,202	10,946
Muestra 3	49,449	63,346	13,897

CALCULO DE LA HUMEDAD (%)	
Muestra 1	64,73925064
Muestra 2	64,17138555
Muestra 3	63,62041885
MEDIA	64,17701835

- Descenso de humedad tras exposición de 0 a 2 días:

PESADA TRAS 2 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	52,188	20,033
Muestra 2	49,256	72,786	23,53
Muestra 3	49,449	75,433	25,984

PESADA EN HORNO TRAS 2 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	40,294	8,139
Muestra 2	49,256	58,736	9,48
Muestra 3	49,449	59,869	10,42

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	59,37203614
Muestra 2	59,71100722
Muestra 3	59,89839901
MEDIA	59,66048079

- Descenso de humedad tras exposición de 2 a 4 días:

PESADA TRAS 4 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	50,639	18,484
Muestra 2	49,256	70,824	21,568
Muestra 3	49,449	69,324	19,875

PESADA EN HORNO TRAS 4 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	40,634	8,479
Muestra 2	49,256	59,284	10,028
Muestra 3	49,449	58,349	8,9

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	54,1278944
Muestra 2	53,50519288
Muestra 3	55,22012579
MEDIA	54,28440435

- Descenso de humedad tras exposición de 4 a 6 días:

PESADA TRAS 6 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	44,538	12,383
Muestra 2	49,256	70,897	21,641
Muestra 3	49,449	68,831	19,382

PESADA EN HORNO TRAS 6 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	38,96	6,805
Muestra 2	49,256	60,623	11,367
Muestra 3	49,449	59,423	9,974

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	45,04562707
Muestra 2	47,4747008
Muestra 3	48,53988237
MEDIA	47,02007008

- Descenso de humedad tras exposición de 6 a 8 días:

PESADA TRAS 8 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	43,468	11,313
Muestra 2	49,256	72,05	22,794
Muestra 3	49,449	74,021	24,572

PESADA EN HORNO TRAS 8 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	38,098	5,943
Muestra 2	49,256	61,111	11,855
Muestra 3	49,449	63,75	14,301

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	47,46751525
Muestra 2	47,99069931
Muestra 3	41,79960931
MEDIA	45,75260796

- Descenso de humedad tras exposición de 8 a 10 días:

PESADA TRAS 10 DÍAS DE SECADO			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	47,804	15,649
Muestra 2	49,256	74,021	24,765
Muestra 3	49,449	75,347	25,898

PESADA EN HORNO TRAS 10 DÍAS			
	Peso Vaso (g)	Peso total (g)	Peso del Alperujo (g)
Muestra 1	32,155	41,23	9,075
Muestra 2	49,256	64,08	14,824
Muestra 3	49,449	64,92	15,471

CALCULO DE LA HUMEDAD	
Muestra 1	42,00907406
Muestra 2	40,14132849
Muestra 3	40,26179628
MEDIA	40,80406628

8.1.2 Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.

Partiendo de los datos obtenidos en el análisis químico elemental para una muestra de nuestro residuo con un 0% de humedad, se debe de proceder al ajuste de estos datos, ya que la composición variara dependiendo del contenido en humedad con el que trabajemos.

Los valores obtenidos para la muestra seca son los siguientes:

Análisis Químico elemental (%peso)					
	C	H	N	O	S
Muestra 1	44,005	6,426	1,2036	48,2404	0,1251
Muestra 2	43,9213	6,4352	1,2559	48,3092	0,0784

Si utilizamos como base calculo 100 kg de residuo, sabemos que para una muestra con 0% de humedad, los valores CHNS son los indicados en la tabla anterior, sin embargo, cuando trabajamos con combustibles con humedad, debemos llevar a cabo el ajuste de estos valores ya que de los 100 kg una fracción del peso será exclusivamente agua.

El ajuste se lleva a cabo mediante interpolación con los datos ya obtenidos.

Una vez hallados los valores, se procede al cálculo del PCI, a través de la fórmula de Dulong, ecuación ya citada anteriormente:

$$PCI = 8140 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2220 S - 600 \cdot H_2O \quad (3)$$

De donde:

- 8140 kcal /kg - Poder calorífico del carbono.
- C - Contenido de carbono en peso, presente en el combustible.
- 29000 kcal /kg - Poder calorífico del hidrógeno.
- H - Contenido de hidrógeno en peso, presente en el combustible.
- O - Contenido de oxígeno en peso, presente en el combustible.
- 2220 kcal/kg - Poder calorífico del Azufre.
- S - Contenido de azufre en peso, presente en el combustible.
- 600 kcal/kg - Calor latente del agua.
- H₂O - Humedad del combustible.

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 64.177%:

		C	H	N	O	S
Muestra 64,177% humedad	Muestra 1	15,76391115	2,30198598	0,431165628	17,281158	0,0448146
35,823 kg combustible seco	Muestra 2	15,7339273	2,3052817	0,449901057	17,305805	0,0280852
	MEDIA	15,74891922	2,303633838	0,440533343	17,2934816	0,0364499

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	938,8743176	3928,250145

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 59.664%:

		C	H	N	O	S
Muestra 59,664% humedad	Muestra 1	17,7498568	2,59199136	0,485484096	19,458248	0,0504603
40,336 kg combustible seco	Muestra 2	17,71609557	2,59570227	0,506579824	19,485999	0,0316234
	MEDIA	17,73297618	2,593846816	0,49603196	19,4721233	0,04104188

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1105,664497	4626,100256

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 54.284%:

		C	H	N	O	S
Muestra 54,284% humedad	Muestra 1	20,11714978	2,93768446	0,550232962	22,053388	0,0571902
45,715 kg combustible seco	Muestra 2	20,07888582	2,94189029	0,57414222	22,084841	0,035841
	MEDIA	20,0980178	2,939787374	0,562187591	22,0691145	0,04651562

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1304,482234	5457,953665

- Cálculo análisis elemental del residuo para una humedad de 47.02%:

		C	H	N	O	S
Muestra 47,02% humedad	Muestra 1	23,313849	3,4044948	0,63766728	25,557764	0,066278
52,98 kg combustible seco	Muestra 2	23,26950474	3,40936896	0,66537582	25,594214	0,0415363
	MEDIA	23,29167687	3,40693188	0,65152155	25,575989	0,05390715

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1572,957878	6581,255763

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 45.752%:

		C	H	N	O	S
Muestra 45,752% humedad	Muestra 1	23,87156837	3,48593792	0,652921706	26,169163	0,0678635
54,247 kg combustible seco	Muestra 2	23,8261633	3,49092868	0,681293097	26,206485	0,04253
	MEDIA	23,84886583	3,488433304	0,667107402	26,1878239	0,05519673

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1619,79809	6777,235207

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 40.804%:

		C	H	N	O	S
Muestra 40,804% humedad	Muestra 1	26,0491998	3,80393496	0,712483056	28,556387	0,0740542
59,196 kg combustible seco	Muestra 2	25,99965275	3,80938099	0,743442564	28,597114	0,0464097
	MEDIA	26,02442627	3,806657976	0,72796281	28,5767506	0,06023193

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1802,687051	7542,442622

8.2 ANEXO II. Resultados humedad y obtención del PCI para el segundo ensayo. Hoja de cálculo.

8.2.1 *Peso de muestras y cálculo de humedad.*

El procedimiento de ensayo se lleva a cabo de igual manera al anterior, teniendo que recoger muestras en intervalos de 2 días, durante todo el proceso de secado, para poder realizar el cálculo de la humedad. Los valores de humedad obtenidos son los siguientes:

DIAS EXP.	Humedad
0	67
2	60,5366
4	53,1854
6	43,8933
8	41,317
10	39,901

8.2.2 *Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.*

A continuación, se procede al nuevo cálculo de las composiciones CHNS, para los nuevos porcentajes de humedad obtenidos. El procedimiento de cálculo es el mismo al utilizado en el ensayo anterior.

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 67%:

		C	H	N	O	S
Muestra 67% humedad	Muestra 1	14,52165	2,12058	0,397188	15,919332	0,041283
33 kg combustible	Muestra 2	14,494029	2,123616	0,414447	15,942036	0,025872
	MEDIA	14,5078395	2,122098	0,4058175	15,930684	0,0335775

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	834,5426808	3491,726576

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 60.536%:

		C	H	N	O	S
Muestra 60,536% humedad	Muestra 1	17,3658692	2,5359181	0,4749815	19,037302	0,0493687
39,463 kg combustible	Muestra 2	17,3328383	2,5395487	0,4956208	19,064453	0,0309393
	MEDIA	17,34935374	2,5377334	0,48530116	19,0508774	0,04015401

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1073,415193	4491,169166

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 53.185%:

		C	H	N	O	S
Muestra 53,185% humedad	Muestra 1	20,6007647	3,0083062	0,5634605	22,58355	0,0585651
46,814 kg combustible	Muestra 2	20,5615809	3,0126131	0,5879446	22,615759	0,0367026
	MEDIA	20,58117282	3,01045967	0,57570254	22,5996545	0,04763386

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1345,098766	5627,893238

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 43.893%:

		C	H	N	O	S
Muestra 43,893% humedad	Muestra 1	24,6897533	3,6054165	0,6753002	27,066097	0,0701895
56,1067kg combustible	Muestra 2	24,642792	3,6105784	0,704644	27,104698	0,0439877
	MEDIA	24,66627268	3,60799745	0,68997214	27,0853972	0,05708857

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1688,513574	7064,740794

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 41.317%:

		C	H	N	O	S
Muestra 41,317% humedad	Muestra 1	25,8234542	3,7709696	0,7063086	28,308914	0,0734124
58,683 kg combustible	Muestra 2	25,7743365	3,7763684	0,7369998	28,349288	0,0460075
	MEDIA	25,79889531	3,773669	0,72165419	28,3291009	0,05970995

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1783,727742	7463,116872

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 39.901%:

		C	H	N	O	S
Muestra 39,901% humedad	Muestra 1	26,446565	3,8619617	0,7233516	28,991998	0,0751838
60,099 kg combustible	Muestra 2	26,3962621	3,8674908	0,7547833	29,033346	0,0471176
	MEDIA	26,42141352	3,86472629	0,73906745	29,0126721	0,06115073

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1836,05987	7682,074496

8.3 ANEXO III. Resultados humedad y obtención del PCI para el tercer ensayo. Hoja de cálculo.

8.3.1 *Peso de muestras y cálculo de humedad.*

El procedimiento de ensayo se lleva a cabo de igual manera al anterior, teniendo que recoger muestras en intervalos de 2 días, durante todo el proceso de secado, para poder realizar el cálculo de la humedad. Los valores de humedad obtenidos son los siguientes:

DIAS EXP.	Humedad
0	67
2	60,5366
4	53,1854
6	43,8933
8	41,317
10	39,901

8.3.2 *Cálculo del análisis CHNS y PCI según porcentaje de humedad.*

A continuación, se procede al nuevo cálculo de las composiciones CHNS, para los nuevos porcentajes de humedad obtenidos. El procedimiento de cálculo es el mismo al utilizado en el ensayo anterior.

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 64.177%:

		C	H	N	O	S
Muestra 64,177% humedad	Muestra 1	15,7639112	2,301986	0,4311656	17,281158	0,0448146
35,823 kg combustible	Muestra 2	15,7339273	2,3052817	0,4499011	17,305805	0,0280852
	MEDIA	15,74891922	2,30363384	0,44053334	17,2934816	0,0364499

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	938,8743176	3928,250145

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 59.491%:

		C	H	N	O	S
Muestra 59,491% humedad	Muestra 1	17,8256334	2,6030569	0,4875567	19,541318	0,0506758
40,508 kg combustible	Muestra 2	17,791728	2,6067837	0,5087425	19,569187	0,0317584
	MEDIA	17,80868073	2,60492031	0,49814959	19,5552525	0,04121709

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1112,028616	4652,72773

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 51.511%:

		C	H	N	O	S
Muestra 51,511% humedad	Muestra 1	21,3372764	3,1158582	0,5836052	23,39095	0,0606589
48,488 kg combustible	Muestra 2	21,2966917	3,1203191	0,6089646	23,42431	0,0380148
	MEDIA	21,31698406	3,11808862	0,59628487	23,4076298	0,04933685

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1406,954898	5886,699295

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 44.510%:

		C	H	N	O	S
Muestra 44,510% humedad	Muestra 1	24,4179785	3,5657296	0,6678668	26,768164	0,0694169
55,489 kg combustible	Muestra 2	24,3715341	3,5708346	0,6968876	26,80634	0,0435035
	MEDIA	24,39475627	3,56828206	0,68237721	26,787252	0,05646016

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	1665,688488	6969,240632

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 34.502%:

		C	H	N	O	S
Muestra 34,502% humedad	Muestra 1	28,8222189	4,2088758	0,7883291	31,596304	0,0819375
65,497 kg combustible	Muestra 2	28,7673974	4,2149016	0,8225844	31,641367	0,0513501
	MEDIA	28,79480813	4,21188867	0,80545674	31,6188354	0,06664381

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	2035,579804	8516,865901

- Cálculo análisis elemental CHNS del residuo para una humedad de 10.665%:

		C	H	N	O	S
Muestra 10,665% humedad	Muestra 1	39,3118668	5,7406671	1,0752361	43,095561	0,1117581
89,335 kg combustible	Muestra 2	39,2370934	5,7488859	1,1219583	43,157024	0,0700386
	MEDIA	39,27448005	5,74477651	1,09859716	43,1262926	0,09089836

	kcal/kg	kJ/kg
PCI	2916,555702	12202,86906

8.4 ANEXO IV. Cálculo de la eficiencia de secado del prototipo. Hoja de cálculo.

A continuación, quedan reflejados los cálculos llevados a cabo para la obtención de la eficiencia de secado de nuestro prototipo. Para ello se utilizará la fórmula ya citada en apartados anteriores:

$$\eta = \frac{h_v \cdot P_{muestra} \cdot \frac{(m_o - m_F)}{100}}{E_{solar} \cdot \alpha_s \cdot S_{secador}} \quad (4)$$

Donde:

- η - Rendimiento de secado.
- h_v - Calor latente vaporización del agua, equivalente a 2260 kJ/kg.
- $P_{muestra}$ - Peso de la muestra ensayada.
- m_o - Porcentaje inicial de humedad contenida en la muestra.
- m_F - Porcentaje final de humedad contenida en la muestra.
- E_{solar} - Irradiación solar recibida durante el proceso de secado.
- α_s - Coeficiente de absorción del vidrio.
- $S_{secador}$ - Superficie del secador.

Los datos invariables, necesarios para llevar a cabo el cálculo de la eficiencia, son los siguientes:

Calor latente vaporización agua (kJ/kg)	2260
Peso muestra (kg)	10
Coeficiente absorción vidrio	0,8
Superficie secador (m²)	0,364816

8.4.1 Ensayo 1.

Días	Humedad	Irradiación (MJ/m ²)	Eficiencia de secado (%)
0	64,177	-	-
1	-	23,2	-
2	59,6604	20,5	7,999369926
3	-	19,7	-
4	54,2844	20,8	8,266682541
5	-	22,9	-
6	47,02	22,8	9,293196127
7	-	21,2	-
8	45,7526	22,7	7,458929188
9	-	25,4	-
10	40,804	23,8	7,374668424
MEDIA			8,078569241

8.4.2 Ensayo 2.

Días	Humedad	Irradiación (MJ/m ²)	Eficiencia de secado (%)
0	67	-	-
1	-	21,4	-
2	60,5366	20,6	12,21388
3	-	23,5	-
4	53,1854	21,8	12,5593185
5	-	21,2	-
6	43,8933	20,7	14,1944123
7	-	22,5	-
8	41,317	23,2	11,6546153
9	-	22,2	-
10	39,901	20,7	9,8750065
MEDIA			12,0994471

8.4.3 Ensayo 3.

Días	Humedad	Irradiación (MJ/m ²)	Eficiencia de secado (%)
0	64,177		
1		25,5	
2	59,4918	26,7	7,5782998
3		27	
4	51,5117	26,9	10,0789258
5		25,9	
6	44,5109	26,5	10,4761842
7		27,5	
8	34,5624	27,6	11,7062763
9		28	
10	10,6651	27,7	16,7775355
MEDIA			11,3234443

8.5 ANEXO V. Planos diseño inicial del prototipo.

H G F E D C B A

4

3

2

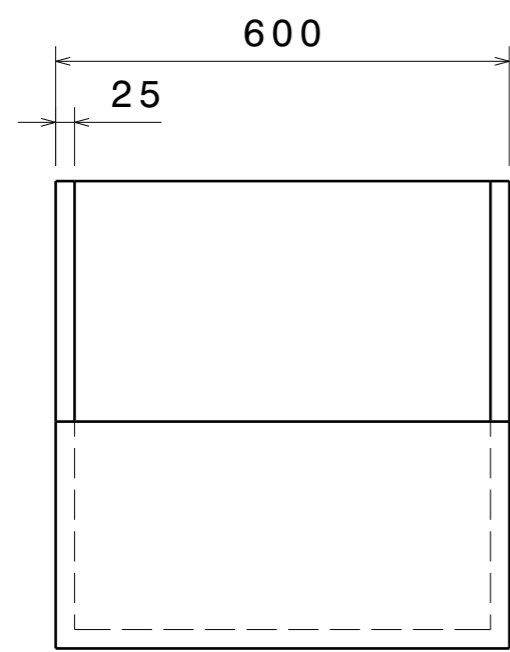
1

4

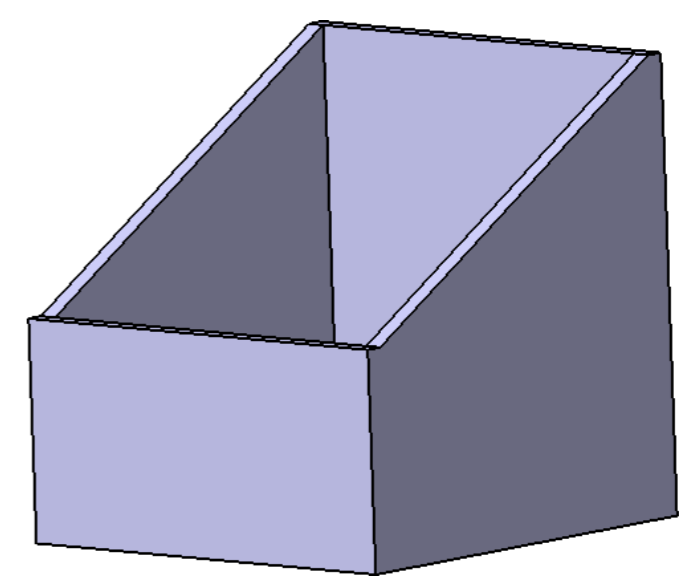
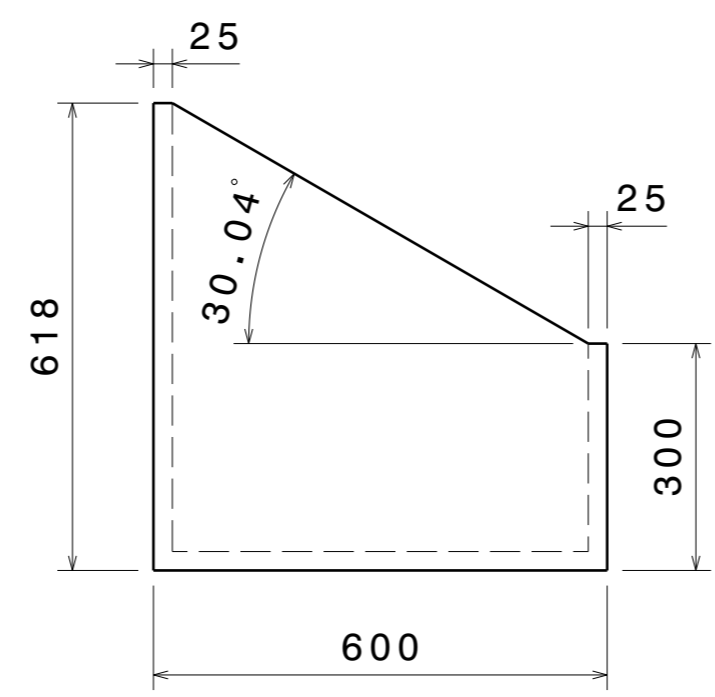
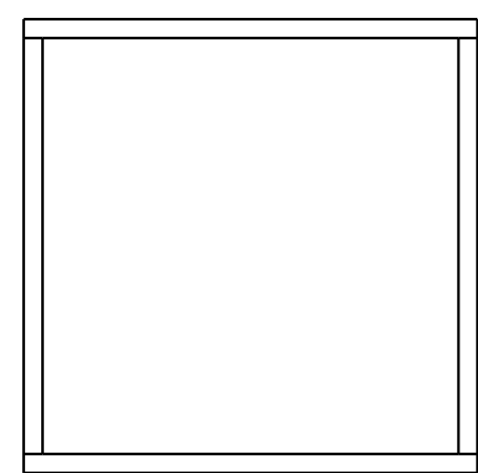
3

2

1



Front view
Scale: 1:10



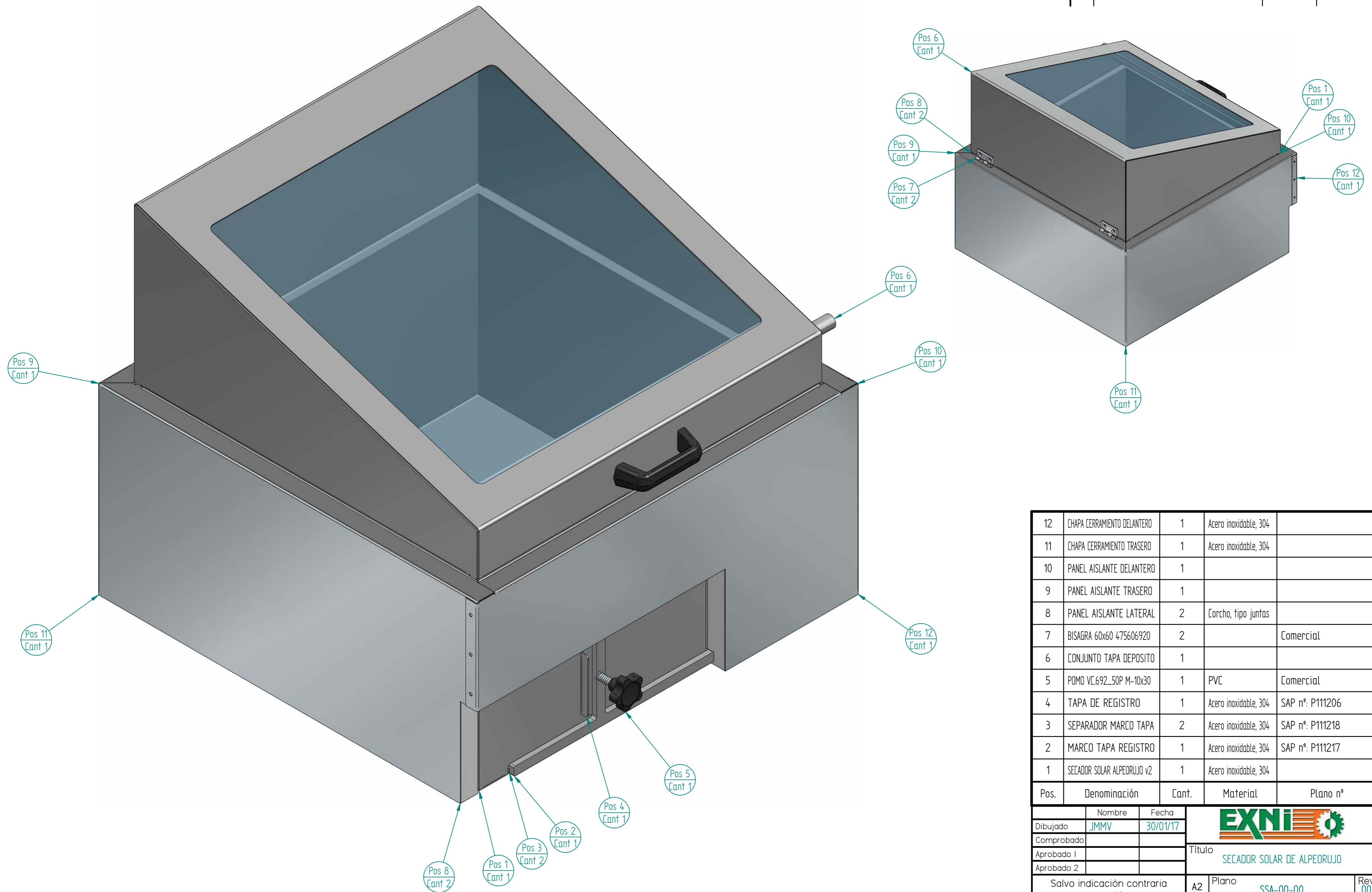
Isometric view
Scale: 1:10

DESIGNED BY: perei		Modelo 3: 600x600x300		I	-
DATE: 27/10/2016		Vidrio: 636x600 = 0.382 m2		H	-
CHECKED BY: XXX				G	-
DATE: XXX				F	-
SIZE A3				E	-
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	DRAWING NUMBER XXX	SHEET 1/1	D	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.				C	-
				B	-
				A	-


H G B A

8.6 ANEXO VI. Planos diseño final del prototipo.

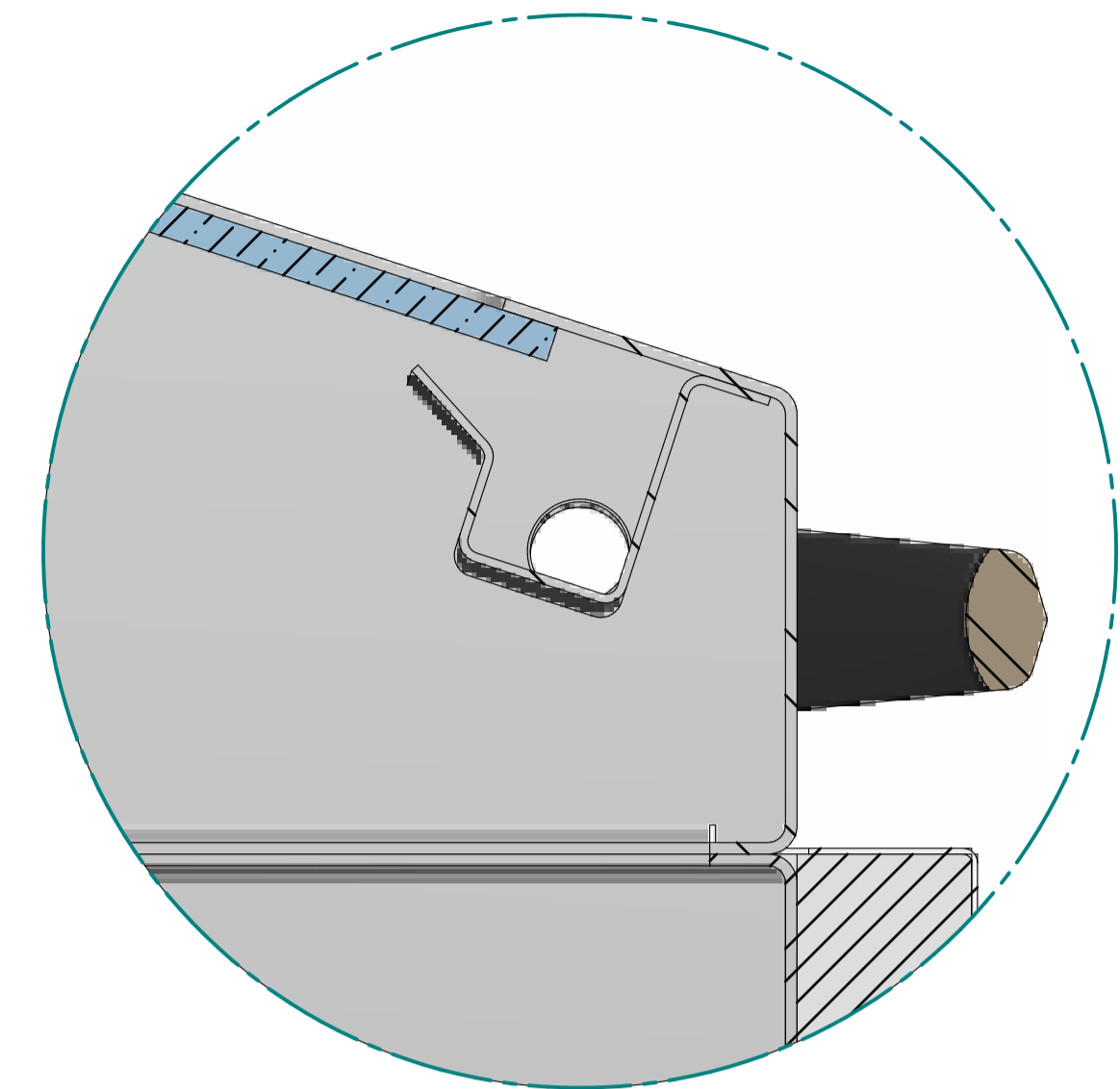
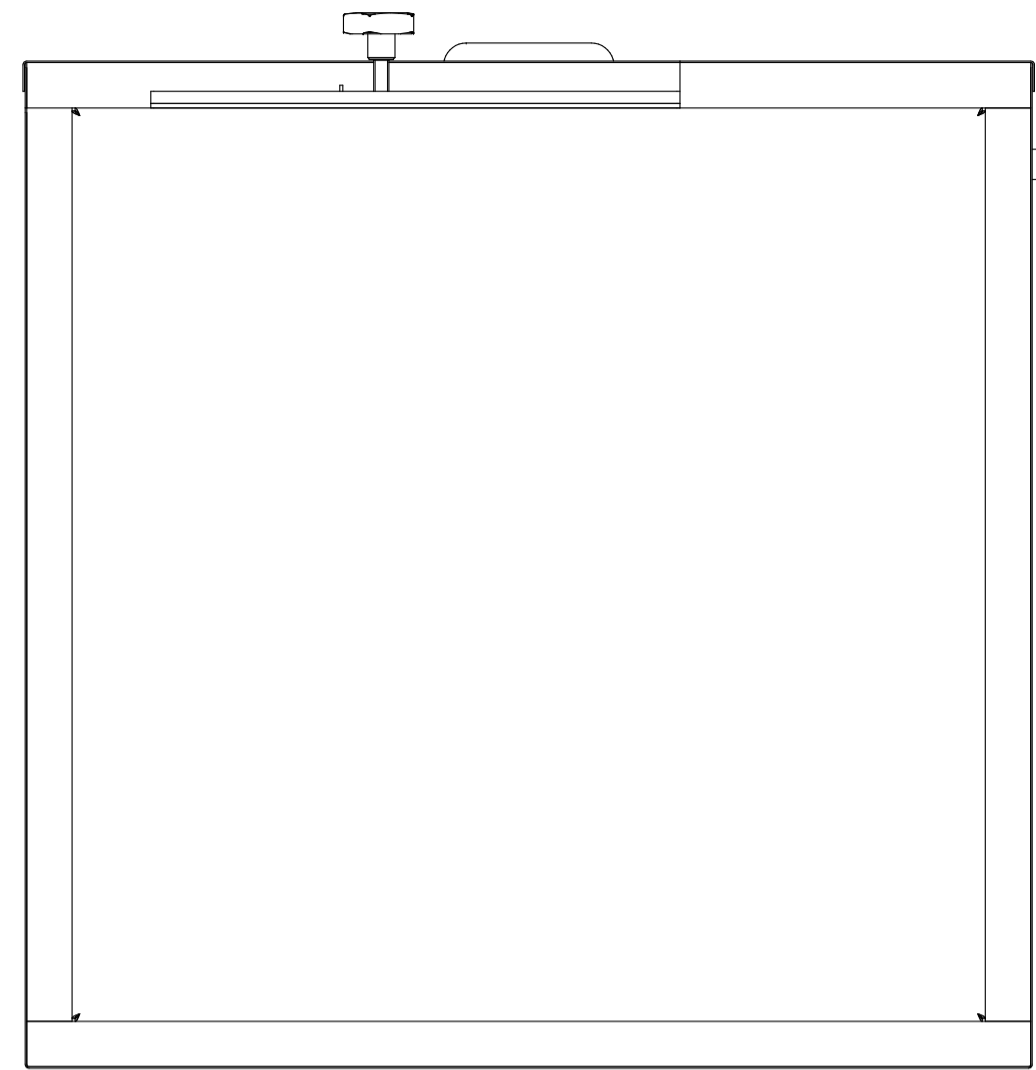
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



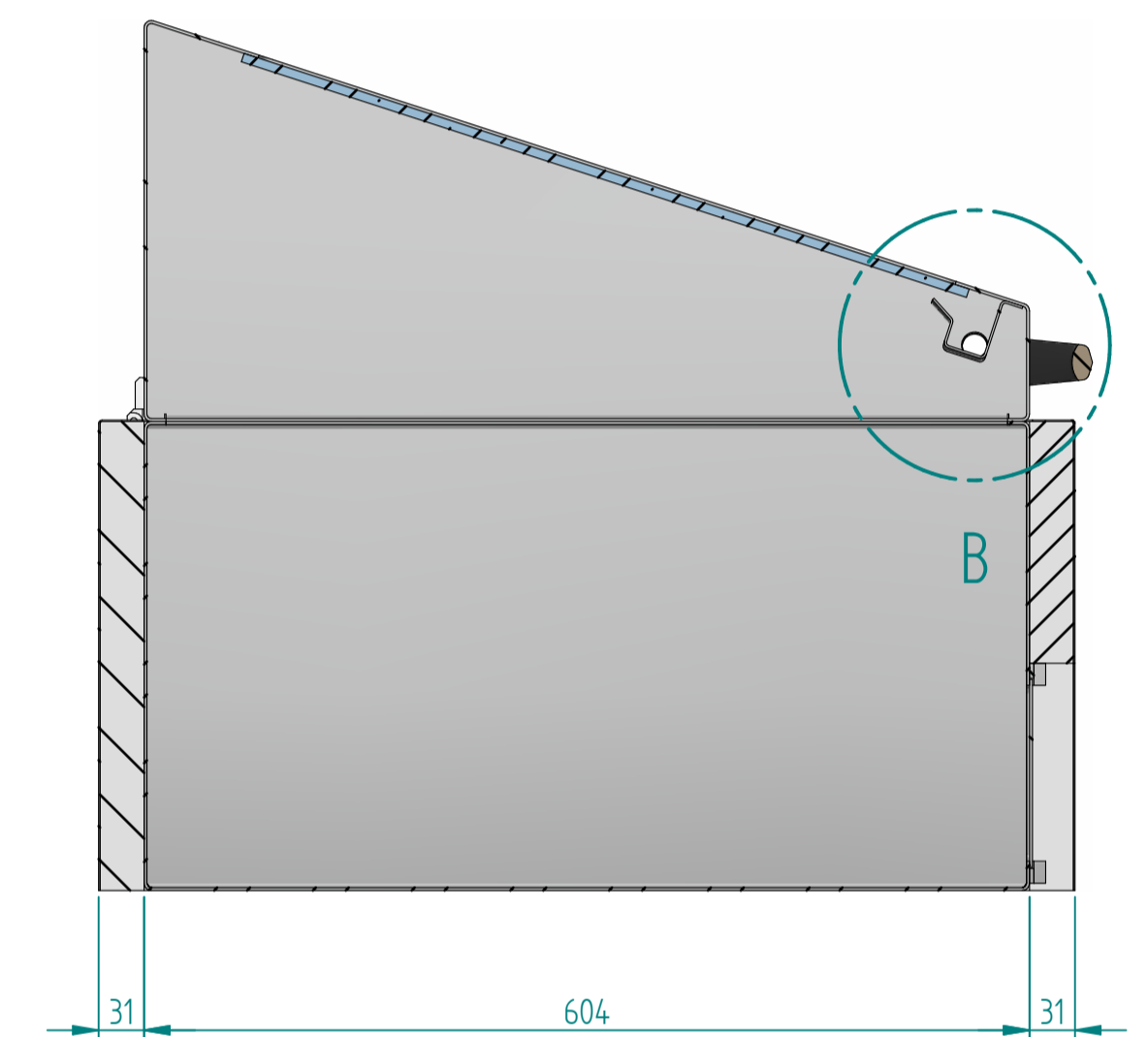
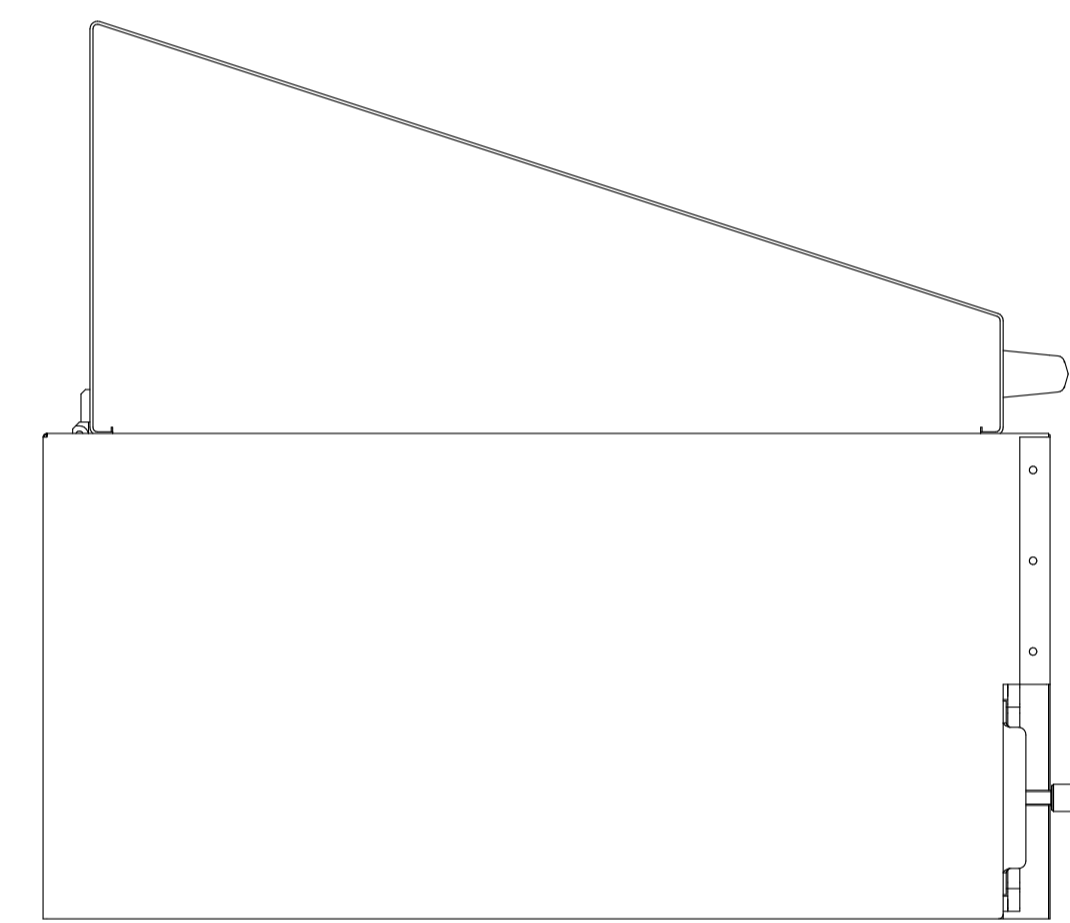
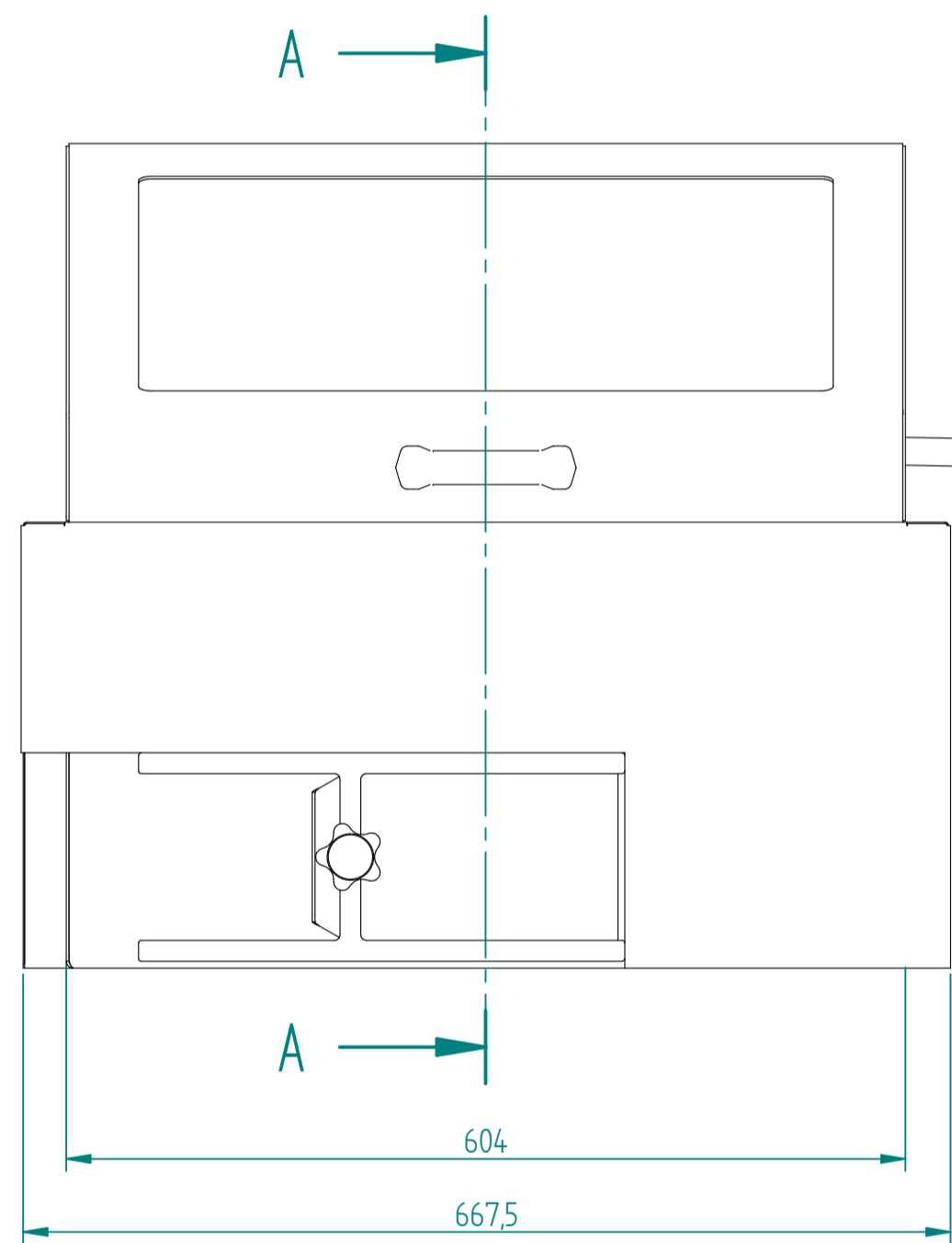
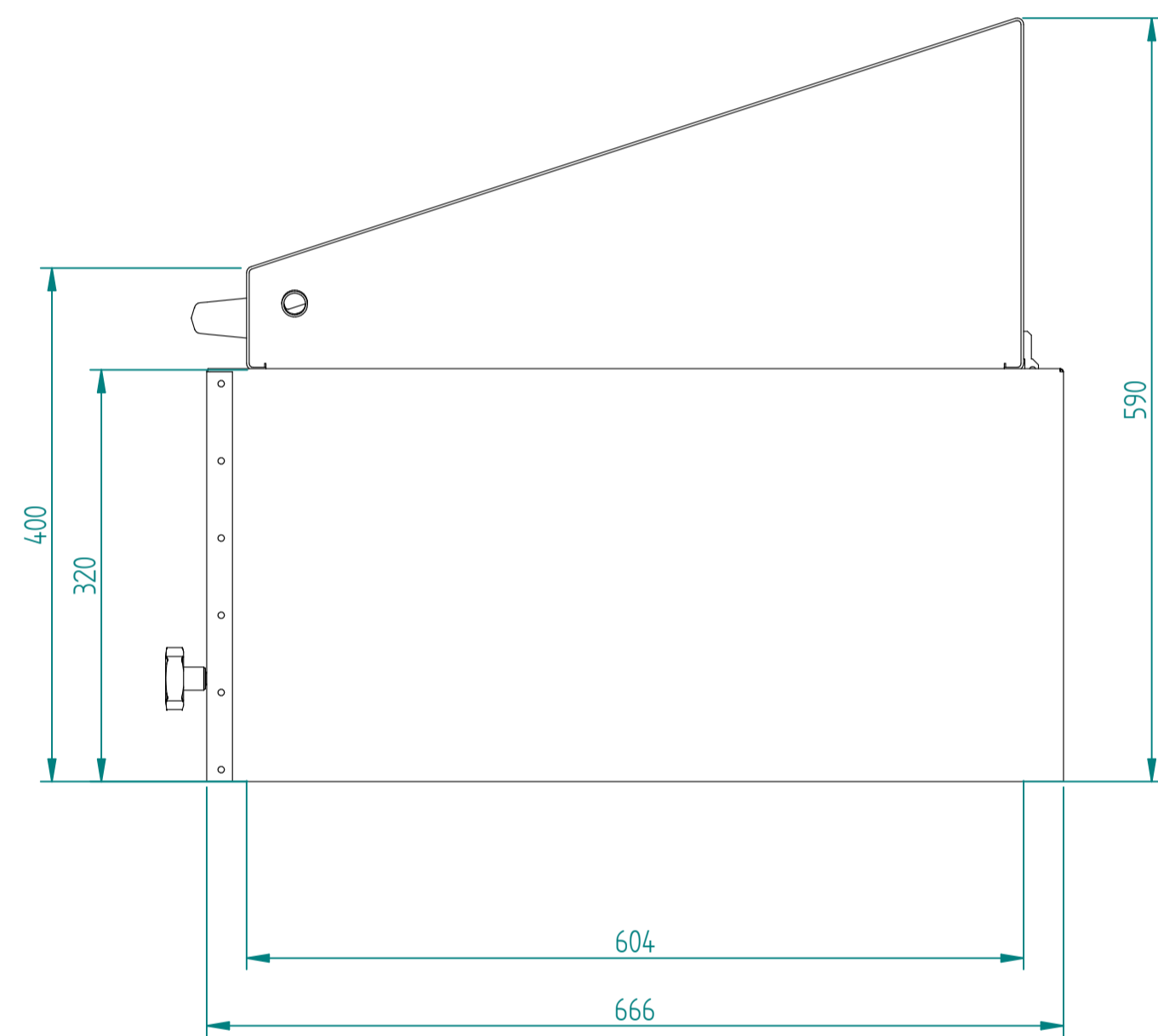
Pos.	Denominación	Cant.	Material	Plano nº
12	CHAPA CERRAMIENTO DELANTERO	1	Acero inoxidable, 304	
11	CHAPA CERRAMIENTO TRASERO	1	Acero inoxidable, 304	
10	PANEL AISLANTE DELANTERO	1		
9	PANEL AISLANTE TRASERO	1		
8	PANEL AISLANTE LATERAL	2	Corcho, tipo juntas	
7	BISAGRA 60x60 475606920	2		Comercial
6	CONJUNTO TAPA DEPOSITO	1		
5	POMO VC.692_50P M-10x30	1	PVC	Comercial
4	TAPA DE REGISTRO	1	Acero inoxidable, 304	SAP nº: P111206
3	SEPARADOR MARCO TAPA	2	Acero inoxidable, 304	SAP nº: P111218
2	MARCO TAPA REGISTRO	1	Acero inoxidable, 304	SAP nº: P111217
1	SECADOR SOLAR ALPEORUJO v2	1	Acero inoxidable, 304	

Dibujado	Nombre	Fecha	
Comprobado	JMMV	30/01/17	
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Título			SECADOR SOLAR DE ALPEORUJO
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A2 Plano SSA-00-00 Rev 00 CONJUNTO SECADOR SOLAR ALPEORUJO Escala 13 Peso Hoja 1 de 2

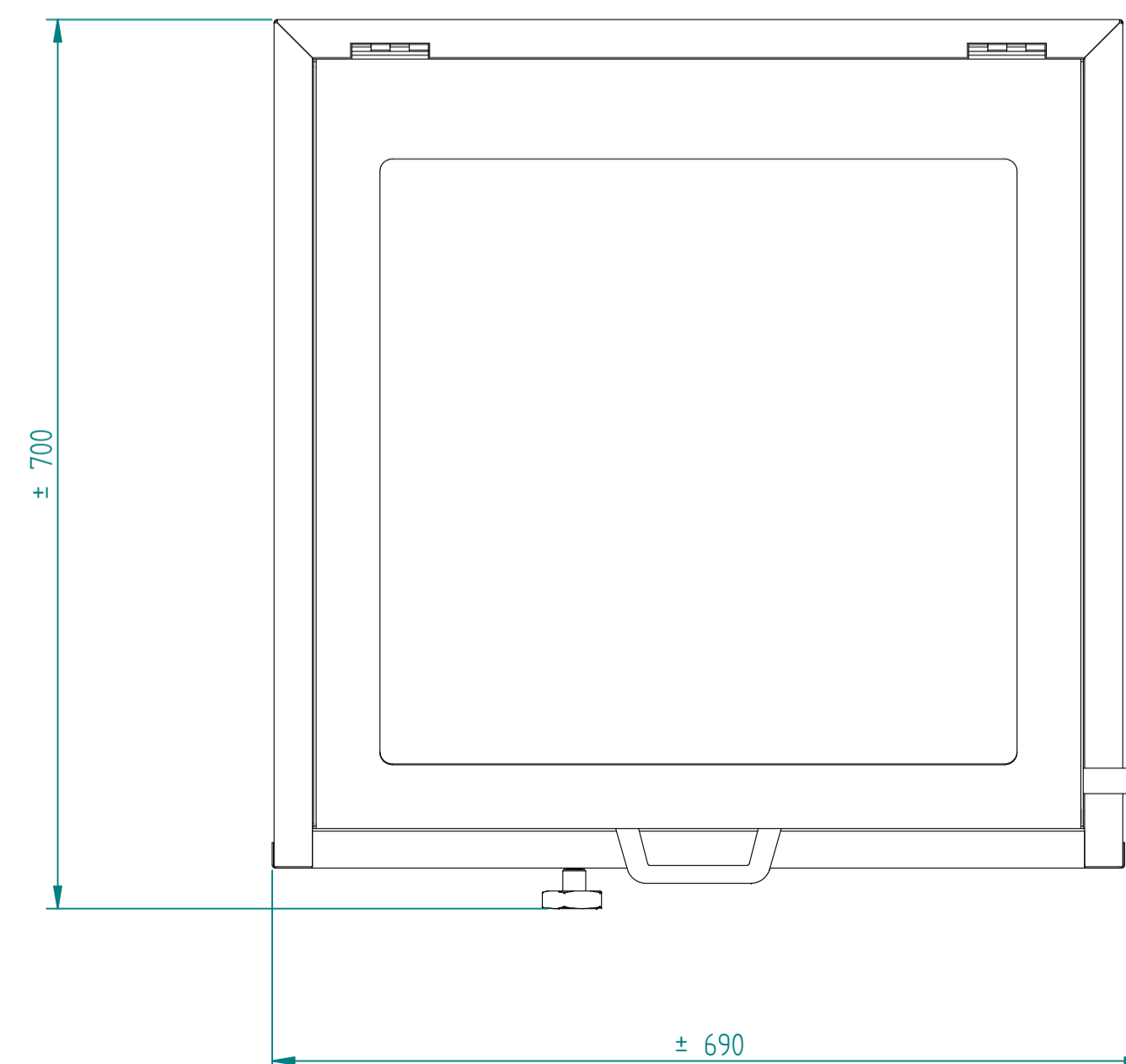
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado




DETALLE B



CORTE A-A



Dibujado	Nombre	Fecha		Título SECADOR SOLAR DE ALPEORUJO
Comprobado	JMMV	30/01/17		
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			AI Plano SSA-00-00	Rev 00
Escala 15 Peso			Hoja 2 de 2	

9 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] C. Buadas and G. Ripoll, “La biomasa en Andalucía,” 2016.
- [2] M. Hermoso, “Elaboración de aceite de oliva de calidad. Obtención por el sistema de dos fases.” p. 83, 1998.
- [3] S. M. U. Alvarado, “Aprovechamiento y valorización del alperujo tratado térmicamente como: fertilizante biológico y fuente de hidroxitrisol,” 2008.
- [4] Dorset GM, “Secado de Biomasa . www.dorset.nu,” 2017. [Online]. Available: <http://www.dorset.nu/es/home-gm-9/aplicaciones/secado-de-biomasa/>.
- [5] V. Verdejo and J. Moro, “Secado térmico,” p. 44, 2010.
- [6] R. A. Torres, J. A. Suárez, and C. C. Bergues, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR TIPO GABINETE PARA EL SECADO DE HOLLEJO DE NARANJA DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR DRYER TYPE CABINET FOR THE DRYING OF,” vol. 27, pp. 53–56, 2011.
- [7] Sitiosolar, “Deshidratación Solar. <http://www.sitiosolar.com/los-deshidratadores-solares/>.” 2013, 2013.
- [8] S. Vijayavenkataraman, S. Iniyar, and R. Goic, “A review of solar drying technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2652–2670, 2012.
- [9] O. . Ekechukwu and B. Norton, “Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 40, no. 6, pp. 615–655, 1999.
- [10] C. O. N. Congeneración, D. E. C. Combinado, B. En, and P. Genil, “Trabajo Fin de Máster TRATAMIENTO Y REDUCCIÓN DE LODOS DE,” 2016.
- [11] A. N. Exclusive and P. Report, “An exclusive plant report,” pp. 59–82, 2009.
- [12] Absorsistem, “Principio de la cogeneracion .www.absorsistem.com,” 2001. [Online]. Available: <http://www.absorsistem.com/tecnologia/cogeneracion/principio-de-la-cogeneracion>.
- [13] Centro Internacional de la Energía, “Plantas de cogeneración. www.ciener.es,” 2013. [Online]. Available: <http://www.ciener.es/index.php/plantas-de-cogeneracion>.
- [14] Multitek, “Microcogeneracion. www.multitekingenieros.com,” 2017. [Online]. Available: <http://www.multitekingenieros.com/microcogeneracion>.
- [15] Dialnet, “Biomasa: Planta de aprovechamiento energético del alperujo,” *CV Rev. Int. energía y medio Ambient.*, vol. 10, no. 109, pp. 18–37, 2006.
- [16] V. F. Mascarell, “Aportación solar a través de cerramientos acristalados en una vivienda unifamiliar aislada,” 2011.

- [17] R. O. Escribano, "Los vidrios de baja emisividad," *Mater. CONSTRUCCIÓN*, Vol. 44, n° 236, vol. 44, no. c, pp. 41–42, 1994.
- [18] UNE-EN ISO 18134-1:2016, "Biocombustibles solidos. Determinación del contenido de humedad. Metodo de secado en estufa. Parte 1: Humedad total." pp. 1–3, 2016.
- [19] R. Echeverri, G. B. Medina, J. D. Restrepo, and J. F. Urrego, "Determinación Del Contenido De Humedad," *Man. Prácticas Lab. Análisis Fis. Aliment.*, pp. 25–35, 2016.
- [20] A. DEMIRBAS and N. ILTEN, "Fuel Analyses and Thermochemical Processing of Olive Residues," *Energy Sources*, vol. 26, no. 8, pp. 731–738, 2004.
- [21] J. E. Gonçalves, M. M. P Sartori, and A. L. Leão, "Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 13, no. 5, pp. 657–661, 2009.
- [22] C. S.a and P. P. Parikh, "A inified correlation for estimating HHV of solid,liquid and gaseous fuels," *Fuel*, vol. 81, pp. 1051–1063, 2002.
- [23] CAMPOS FERNÁNDEZ MANUEL and DELGADO RUIZ FERNANDO, "Escuela Técnica Superior De Ingeniería," 2012.
- [24] J. A. Callejo López, T. Parra Heras, and T. Manrique Gordillo, "Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía," p. 64, 2015.
- [25] IDAE, "Valores PCI carburantes." 2013.
- [26] E. Baniyadi, S. Ranjbar, and O. Boostanipour, "Experimental investigation of the performance of a mixed-mode solar dryer with thermal energy storage," *Renew. Energy*, vol. 112, pp. 143–150, 2017.
- [27] Agencia Andaluza de la Energía, "Datos Radiación Solar.<http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php>." Available: <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion/radiacion1.php>.
- [28] JANAMPA QUISPE, Kléber;; CERÓN BALBOA, Octavio; CORTEZ LEDESMA, C. Nicolás Eusebio; ORÉ GARCÍA, Julio; MONTES DE OCA ALCARRAZ, and O. MORALES MORALES, "Optimización de un prototipo de secador solar para secado de lúcuma en Ayacucho."
- [29] Thermo-system, "Topo Eléctrico," 2016.
- [30] Thermo-system, "Gestor de Lodos," p. 12, 2016.