

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estudio técnico para la integración
energética de un proceso de valorización
de orujillo

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla

Autor: Ángel Ruano Santiago

Tutor: Alicia Ronda Gálvez

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



A mi familia

A mis maestros

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla

Autor:

Ángel Ruano Santiago

Tutor:

Alicia Ronda Gálvez

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Agradecimientos

Quiero agradecer este trabajo a mi padre, mi madre y mi hermana que han dedicado todo su tiempo, esfuerzo y recursos para apoyarme a lo largo de mi vida. Quiero usar este trabajo como cierre generacional de la breve etapa ingenieril de mi tío Fran, y agradecerle de todo corazón a él y mi madrina, por todo lo que me han ayudado y enseñado en estos años. El tiempo y desgaste que supone estudiar en mi caso una ingeniería se vio recompensado por el apoyo de mis amigos y compañeros, agradecerle todo lo que hacen por sacarme a la calle de vez en cuando y alegrarme los días, en especial a María Q.

Agradecer a todos los profesores que me han marcado a lo largo de mi vida, a Clara por enseñarme el maravilloso mundo de las matemáticas, a Maricarmen por enseñarme Química y sus infinitas posibilidades, a Marcelino por hacerme disfrutar aprendiendo inglés, a David por mostrarme el camino hacia el mundo industrial y enseñarme que el ahorro energético es la fuente renovable más importante en el mundo y por último, a Alicia la tutora de este TFG, por la increíble ayuda que he recibido de su parte, haciendo que vea como es de verdad un buen maestro, demostrado lo fuerte que es y lo mucho que se esmera por sus alumnos. A todos ellos y los que me han enseñado a valorar las cosas se lo agradezco y le doy las gracias.

Ángel Ruano Santiago

Sevilla, 2021

Resumen

El aprovechamiento de los recursos forestales y agroalimenticios están girando en los últimos años en torno a una economía circular que prioriza la maximización de la valorización de la corrientes de salida en la actividad industrial. Es por ello, por lo que este trabajo pretende la optimización y realización de un estudio técnico para la integración de un proceso de valorización de orujillo mediante pirólisis aportando diferentes alternativas para la optimización energética del proceso. Modelizando la pirólisis bajo diferentes condiciones de operación contemplando las posibles aplicaciones en la industria y desarrollando un sistema de ahorro de costes para valorar técnica y económicamente las opciones y situaciones más favorables para su tratamiento.

Palabras clave: aceitunas, economía circular, valorización del orujillo, ahorro técnico-económico, pirólisis.

Índice

Agradecimientos	4
Resumen	5
Índice	6
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras	9
1. CONTEXTO	10
2. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE PRODUCCIÓN	13
2.1. <i>Proceso de producción del aceite de oliva</i>	13
2.2. <i>Almazara</i>	13
2.2.1. Línea de Recepción	13
2.2.2. Línea operación	14
2.2.3. Línea de separación sólido-líquido y línea de separación líquido-líquido	15
2.2.4. Comparativa de los métodos de extracción	19
2.3. <i>La orujera</i>	19
2.3.1. Línea de obtención del aceite de orujo crudo	19
3. INTRODUCCIÓN A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	22
3.1. <i>Alternativas para la valorización energética de residuos</i>	22
3.1.1. Valorización energética	22
3.1.2. Conversiones termoquímicas	22
3.1.3. Valorización escogida	24
4. BALANCE DE MATERIA	25
4.1. <i>Estudio de la producción de orujillo</i>	25
5. OBJETIVOS DEL TFG	29
6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO MEDIANTE PIRÓLISIS	30
6.1. <i>Pirólisis</i>	31
6.1.1. Caracterización del orujillo y de los productos obtenidos de la pirólisis	31
6.1.2. Combustión del gas natural	34
6.1.3. Balances en el pirolizador	35
6.2. <i>Combustión del syngas en la caldera</i>	38
6.2.1. Combustión del syngas	38
6.2.2. Balances en la caldera	38
7. ESTUDIO DEL PROCESO COMPLETO Y ESTUDIO DE POSIBLES MEJORAS ENERGÉTICAS	42
7.1. <i>Estudio y diagramas de procesos de los casos base.</i>	42
7.2. <i>Suposiciones</i>	43
7.3. <i>Estudio y diagramas de procesos en los casos con precalentamiento con intercambiadores.</i>	43
7.4. <i>Evaluación del ahorro económico del proceso de valoración del orujillo</i>	44

8. CONCLUSIONES	49
9. Anexos	50
9.1. <i>Datos utilizados para los cálculos aportados</i>	50
9.2. <i>Diagramas de procesos.</i>	50
10. Bibliografía	69

Como aclaración en la información usada en los datos de Tablas y Figuras, los valores numéricos tienen como separación decimal un punto (.) y no una coma (,).

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa de los procesos en la almazara	19
Tabla 2 Tipos de pirólisis	23
Tabla 3 Producción de las campañas de aceite de oliva	25
Tabla 4 Análisis Elemental del orujillo	31
Tabla 5 Descomposición de los productos de pirólisis por orujillo	31
Tabla 6 Correlaciones de cálculo del char	32
Tabla 7 Componentes másicas del char	32
Tabla 8 Correlaciones de cálculo del syngas	33
Tabla 9 Componentes másicas del syngas	33
Tabla 10 Componentes másicas del bio-oil	33
Tabla 11 Cálculo del PCI del biochar y el bio-oil obtenido a diferentes temperaturas	34
Tabla 12 Cálculo del PCI del syngas obtenido a diferentes temperaturas	34
Tabla 13 Composición del gas natural	34
Tabla 14 Cantidad de gas natural	36
Tabla 15 Resumen de los procesos de la pirólisis	37
Tabla 16 Cantidad de vapor sobrecalentado	40
Tabla 17 Resumen de los procesos de la pirólisis	41
Tabla 18 Datos más relevantes caso base 400°C	42
Tabla 19 Datos más relevantes caso base 500°C	42
Tabla 20 Datos más relevantes caso base 600°C	43
Tabla 21 Cantidad de gas natural con precalentamiento	44
Tabla 22 Cantidad de gas natural con precalentamiento sin pre-orujillo	44
Tabla 23 Precio unitario de los costes	45
Tabla 24 Precio unitario de las ventas	45
Tabla 25 Ahorro de costes y proyección de ventas	46
Tabla 26 Ahorro de costes y proyecciones de ventas para 500°C respecto a 400°C como referencia	46
Tabla 27 Ahorro de costes y proyecciones de ventas para 600°C respecto a 400°C como referencia	47
Tabla 28 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 400°C	47
Tabla 29 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 500°C	47
Tabla 30 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 600°C	47
Tabla 31 Datos utilizados para el balance de energía	50
Tabla 32 Datos utilizados para el balance de energía II, energía que consume el proceso de pirólisis	50

Como aclaración en la información usada en los datos de Tablas y Figuras, los valores numéricos tienen como separación decimal un punto (.) y no una coma (,).

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Composición estructural de la aceituna</i>	10
<i>Figura 2 Productos y subproductos de la industria oleícola (método de 2 fases)</i>	11
<i>Figura 3 Tipos de aceite como producto</i>	12
<i>Figura 4 Diagrama de procesos de una extractora</i>	21
<i>Figura 5 Productos de las conversiones termoquímicas</i>	23
<i>Figura 6 Estimación de las corrientes de salida de los procesos implicados en la producción del orujillo</i>	26
<i>Figura 7 Estimación de las corrientes de salida de los procesos implicados en la producción del orujillo II</i>	27
<i>Figura 8 Diagrama del proceso de valorización energética mediante pirólisis</i>	30
<i>Figura 9 Descomposición de los productos de pirólisis por orujillo</i>	31
<i>Figura 10 Caso base proceso de pirólisis 20 toneladas orujillo 400°C</i>	37
<i>Figura 11 Caso base proceso de pirólisis 20 toneladas orujillo 400°C</i>	40

Como aclaración en la información usada en los datos de Tablas y Figuras, los valores numéricos tienen como separación decimal un punto (.) y no una coma (,).

1. CONTEXTO

El aceite de oliva es uno de los pilares fundamentales de la dieta mediterránea, entre ellos de la gastronomía española. Denominado comúnmente como “oro líquido” (Agabo García, 2018) o “oro verde” (Sánchez Muniz, 2009), cuyo olor, frescura y sabor enriquecen cualquier comida. Son muchas las sugerencias sobre los efectos beneficiosos del consumo de aceite de oliva en una dieta equilibrada (Arias, 2019), y está demostrado que hay numerosos estudios que defienden al aceite de oliva como uno de los condicionantes de prevención ante enfermedades cardiovasculares, diabetes, obesidad, colesterol, ... (IOOC, 2021).

El aceite de oliva se obtiene a partir de la aceituna, la cual es el fruto del olivo. El olivo es un árbol no muy exigente, siendo cultivado de manera relativamente fácil (*Olea europaea* – Árboles y Arbustos’, 2021). Soporta temperaturas extremas en las provincias de Sevilla y Córdoba en verano y de Toledo o Teruel en invierno. El número de variedades cultivables del olivo es bastante elevado, alrededor de 260 variedades en España, existiendo ya unas 20 denominaciones de origen para el aceite de oliva virgen (Martínez Álvarez *et al.*, 2005).

La cadena de producción de aceite de oliva abarca al conjunto de agentes económicos que colaboran en la producción de la aceituna, la transformación y comercialización del aceite. En dicho proceso de transformación del aceite de oliva, intervienen dos grandes fases. La primera de ellas corresponde a las almazaras (extracción del aceite de oliva) y a las extractoras (que completan las etapas de extracción de los aceites de orujo). La segunda, está formada por el conjunto de industrias implicadas en las operaciones de refinado y envasado de aceites (Sánchez Narbón, 2017). Por lo tanto, existen cuatro tipos de industrias básicas que intervienen en el proceso de fabricación en el aceite de oliva: almazaras, extractoras, refinadoras y envasadoras. Hay que señalar que la aceituna de mesa es una actividad industrial independiente al estudio que se aborda en este trabajo, por lo que no se incluirá en la industria que se explica a lo largo de este estudio.

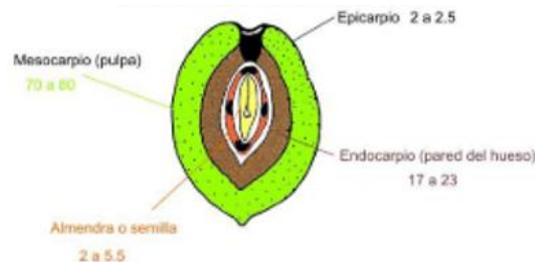


Figura 1 Composición estructural de la aceituna

Fuente: Pariente Gómez (2016)

La composición aproximada de una aceituna es la siguiente (representada en la figura 1): El tejido superficial que envuelve a la aceituna se llama epicarpio y representa entre un 2-2.5% de su peso, el mesocarpio ocupa (70-80%) siendo la zona compuesta por la pulpa y donde se encuentra la mayor parte del jugo. Por último, endocarpio o hueso (17-23%), que es la pared del hueso encargada de proteger la semilla (2-5,5%) (AICA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2021).

Explicándolo desde el punto de vista de la elaboración del aceite, la aceituna se divide entre lo que va destinado al peso del aceite (18-28%), al agua de vegetación (40-50%) y ya por último donde se encuentra el hueso (14-22%) y el material vegetal (30-35%), la semilla (1-3%) y el epicarpio y la pulpa (8-10%) (Béjar Heredia, 2012).

La palabra aceite deriva del vocablo árabe *Az-zait* que significa jugo de la oliva (Sánchez Muniz, 2009). Las aceitunas siendo sometidas a condiciones físicas y mecánicas, dan como producto el aceite de oliva, este se aloja en las células del mesocarpio encerrado mayoritariamente en las vacuolas y disperso, en menor medida, en el tejido coloidal del citoplasma, la tecnología oleícola tiene como objetivo extraer la mayor cantidad de aceite sin perjudicar al producto inicial (Lozano, 2000). Contra más óptima sea la extracción tendrá una mayor calidad y producción. En la Figura 2, se muestra un esquema con los productos y subproductos de la industria oleícola

obtenidos mediante el método de 2 fases.

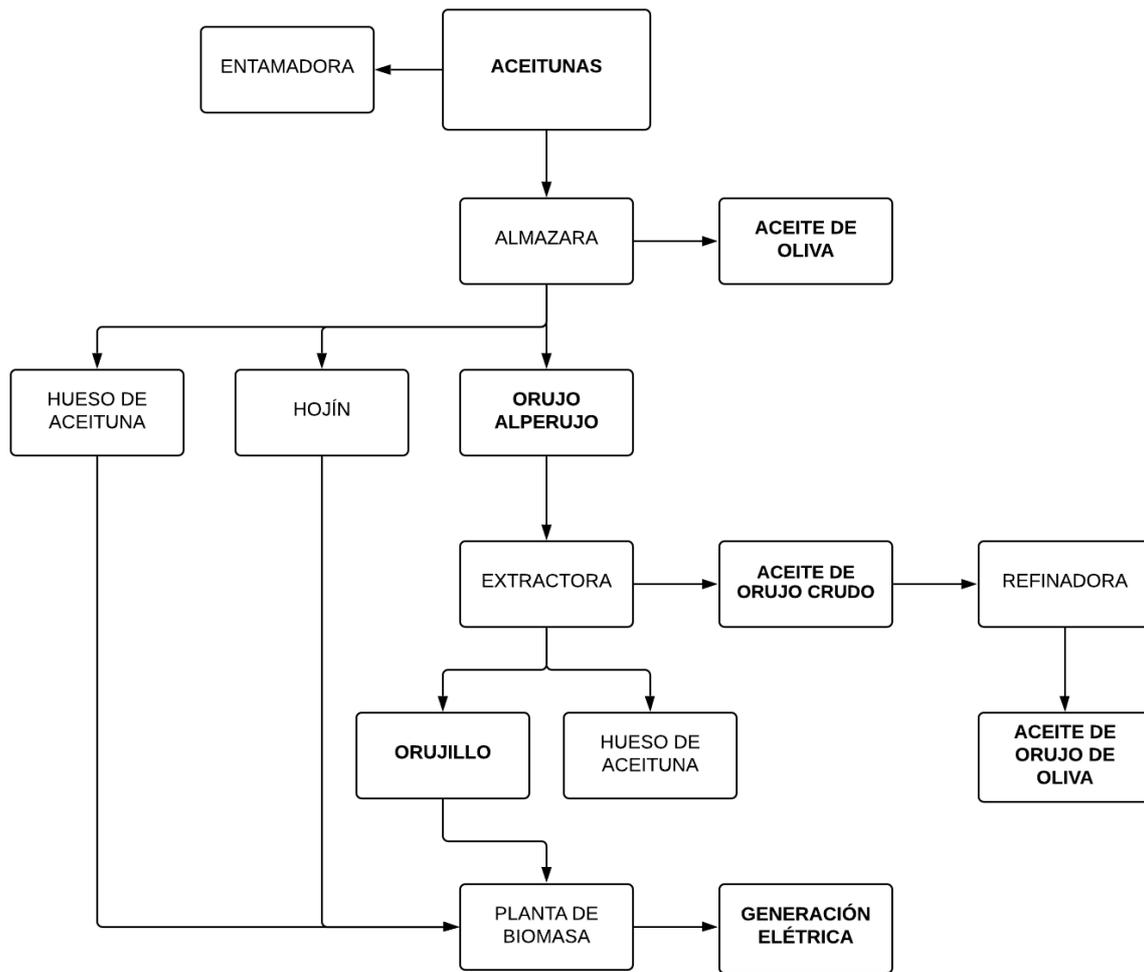


Figura 2 Productos y subproductos de la industria oleícola (método de 2 fases)

Fuente: Elaboración propia con información extraída del CAR/PL (2000); Callejo López et al. (2015)

Como se observa en la Figura 2, el principal producto de una almazara es el aceite de oliva, como resultado de su producción también se dan una serie de subproductos como es el caso del orujo. Los aceites de oliva se subdividen en tres tipos para el consumo alimenticio, en aceites de oliva virgen en función de su sabor, olor y acidez. (i) Aceite de oliva virgen extra (acidez ≤ 0.8 g/100 g), (ii) el aceite de oliva virgen (acidez ≤ 2 g/100 g) y, por último, (iii) el aceite de oliva virgen lampante (acidez 2-3,3 g/100 g) que no es válido para consumo directo, por ello, debe ser refinado, (iv) aceite de oliva refinado (≤ 0.3 g/100 g) y mezclado con otros aceites para dar lugar al (v) aceite de oliva (Agabo García, 2018). Los aceites de oliva refinados poseen menor valor nutricional y funcional que el aceite de oliva virgen, ya que pierden vitaminas y otros compuestos de gran importancia al refinarse (Arias, 2019). El orujo es un residuo solido de las aceitunas retenida en las almazaras durante los procesos de centrifugación, este subproducto se recoge y es llevado para producir aceite de orujo crudo que posteriormente se refinará, (vi) aceite de oliva de orujo refinado (≤ 0.3 g/100 g) y se mezclará con otros aceites de oliva virgen para producir (vii) aceite de orujo de oliva: (≤ 1 g/100 g) (CAR/PL, 2000); (TD/OLIVE OIL.10/6, 2005); (Agabo García, 2018). Los tipos nombrados de aceite de oliva se recogen en la figura 3.

Del sistema de producción de aceite de oliva se obtienen varias corrientes residuales, de las cuales algunas se pueden aprovechar como ocurre con los denominados subproductos. Los subproductos generados en las almazaras son los siguientes: (i) Hojín, (ii) orujo/alperujo y (iii) hueso de aceituna. En las extractoras: (i) Orujillo, (ii) Hueso de aceituna (CAR/PL, 2000). Este espectacular alimento puede dar más de sí, aprovechando esta reliquia del mediterráneo para producir residualmente energía eléctrica mediante dichos subproductos como el orujillo, el hojín y el hueso de aceituna.

La actividad industrial lleva estando enfocada los últimos años en torno a una economía circular, en la que se pretende maximizar la valorización de todas las corrientes de salida de un proceso. Con este fin se propone en la industria del aceite la valorización energética del orujillo para aprovechar al máximo la energía de este subproducto procedente de las extractoras. Dentro de este proceso, el objetivo de este trabajo de fin de grado es el estudio técnico de diferentes alternativas para la optimización energética del proceso, mediante la integración energética de todas las corrientes. Con ello se pretende maximizar un proceso de valorización energética, fomentando así la economía circular en la industria del aceite de oliva. Por ello hay que entender el proceso de producción del aceite de oliva para comprender el alcance de este proyecto.

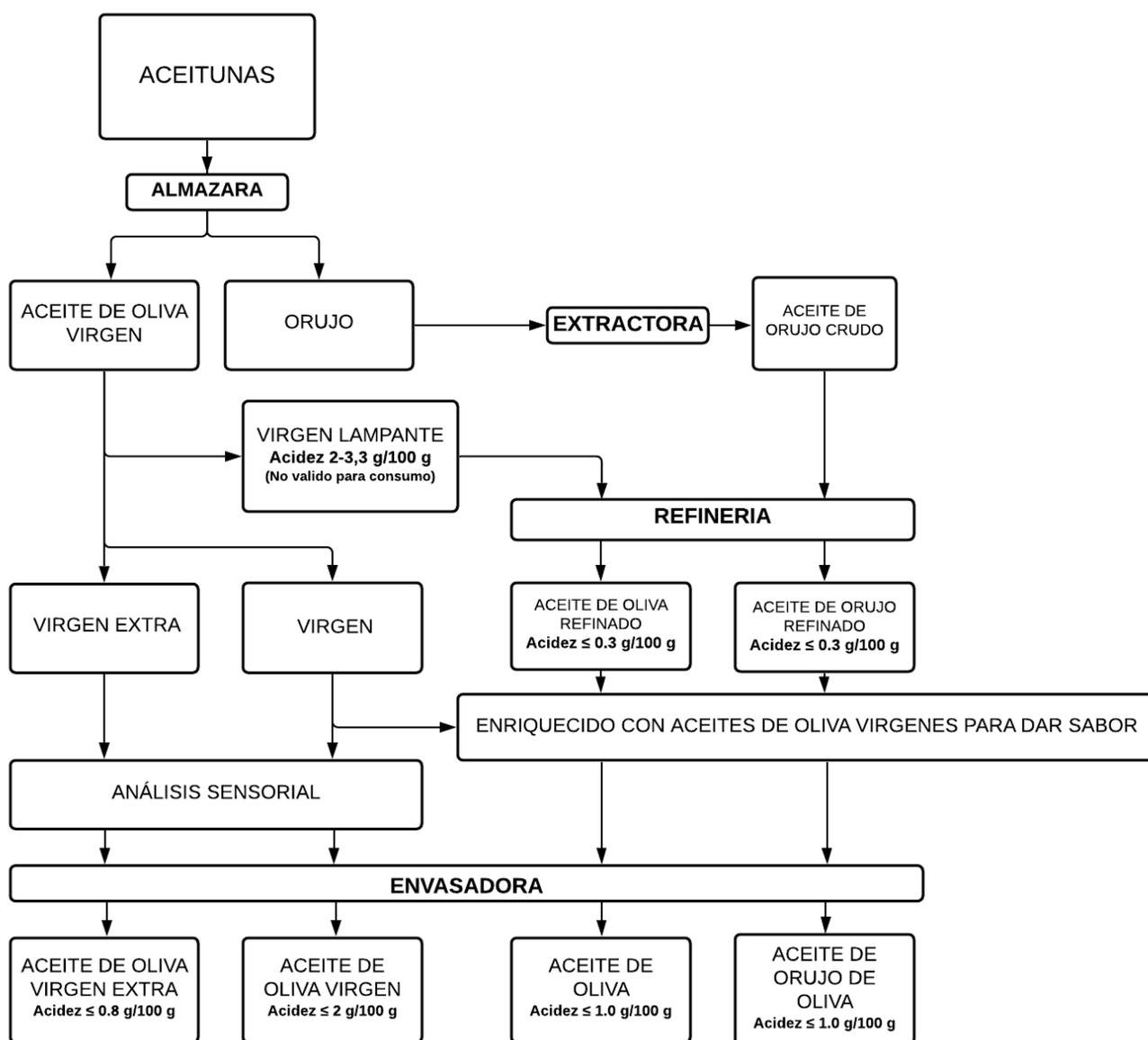


Figura 3 Tipos de aceite como producto

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Esencia de olivo (2021), y de Sánchez Muniz (2009).

2. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE PRODUCCIÓN

2.1. Proceso de producción del aceite de oliva

Según una descripción general del proceso de extracción en almazara, el proceso de producción de aceite normalmente comprende las siguientes fases: recepción de la aceituna, lavado y limpieza, pesado, control de almacenamiento, molienda, batido y separación del aceite. El sistema de separación del aceite ha ido evolucionando, empezando con instalaciones discontinuas por presión (i) (método de prensado) y acabando con instalaciones continuas por centrifugación de pastas (ii) (el método de tres fases) y (iii) (el método de dos fases). El punto de inflexión que hizo que cambiara el concepto de estas instalaciones se dio en los años setenta con la puesta en marcha de las instalaciones continuas con el uso de nueva maquinaria las cuales sustituyeron a la tradicional maquinaria (Pariante Gómez, 2016). Un aspecto importante en la producción es la alta cantidad de energía que consume el proceso de molienda y separación de aceite. Con referencia a una tonelada tratada de oliva, la cantidad de energía es de 40,000–50,000 y 48,000–65,000 KJ en prensado y en sistemas de centrifugado respectivamente (Niaounakis, 2006). Durante muchos años se ha puesto énfasis en la reducción de los costes en la extracción del aceite de oliva, en la actualidad la mayoría de almazaras utilizan la centrifugación en dos fases para mejorar la calidad del aceite y reducir la producción máxima de alpechín que se crea con los otros dos métodos (Lozano, 2000).

Por cada 100 kg de aceituna se obtiene 75 litros de alpechín. El alpechín es el residuo líquido como consecuencia de la adición de agua, este se trata como muy contaminante y perjudicial para el medio ambiente y de muy difícil tratamiento. Debido a estos inconvenientes visibles en la producción del aceite de oliva en 1983 se reguló en España el tratamiento y la depuración de los subproductos en almazara, prohibiendo la descarga directa de alpechín en lugares públicos debido a su gran impacto medioambiental (Iglesias Loredó, 2019).

Los residuos generados en la almazara pueden ser de dos tipos: sólidos y líquidos. Con el avance de la tecnología algunos residuos se han convertido en un subproducto. El sistema de extracción se ha ido mejorando, facilitando herramientas para optimizar procesos y recuperar parte de lo que antes se daba como residuo. Ese mismo caso es el del orujo, del cual se puede sacar aceite de orujo de oliva, pero también hay subproductos muy interesantes que se verán a lo largo de este estudio. Todos estos procesos de reciclaje y aprovechamiento han ido surgiendo a raíz de los años, no solo por el avance técnico sino también a la demanda generalizada por los efectos nocivos en el medioambiente y en la salud de las personas.

2.2. Almazara

2.2.1. Línea de Recepción

2.2.1.1. Recolección

Según el nivel de maduración, el fruto es recogido durante los meses de las campañas de recolección. El período de maduración dependerá de factores tales como el crecimiento geográfico, condiciones climáticas, técnicas de cultivo y variedades de aceituna (Agabo García, 2018). Es entonces cuando son recogidas usando los diferentes métodos de recolección. Guardia Rubio (2009) habla de que el aceite de buena calidad se obtiene mediante una recogida de la aceituna de forma manual mediante el ordeño o el vareo. Ella explica los diferentes procesos de

recolección de la aceituna: el ordeño que es el utilizado para la recolección manual de aceitunas de mesa o aceite de oliva virgen extra especial. En este caso, el fruto debe no estar muy maduro y el árbol se preserva de cualquier tipo de agresión que produciría la maquinaria.

Vareo: consiste en sacudir las ramas del árbol con una vara de madera o de fibra de hasta 4 metros de longitud, con el fin de hacer caer las aceitunas sobre unos mantos de plástico que se extiende debajo de los olivos.

Vibración: una manera mecánica mediante cables tensados genera unas vibraciones de inercia que someten a las aceitunas a que caigan del árbol mediante máquinas vibratoras manejadas desde tractores.

Recogida del suelo: los operadores pueden repasar la zona con barredoras y aspiradoras hasta recoger las aceitunas caídas del árbol. Obviamente, la calidad del aceite obtenido de estas aceitunas es más pobre debido a que son muy evidentes los defectos organolépticos, como el sabor a moho y tierra, que son típicos de este tipo de recolección.

2.2.1.2. Recepción de la aceituna

Una vez recolectada, la oliva se descarga con ayuda de camiones antes del lavado en la tolva de recepción que se encuentra enterrada bajo tierra en el patio de la almazara (Iglesias Loredo, 2019). En el área de recepción el supervisor encargado evalúa el estado del fruto y decide la finalidad de cada tanque de aceitunas (Agabo García, 2018).

2.2.1.3. Lavado y limpieza

La cinta transportadora es la que tiene la función de conducir a las aceitunas desde la tolva de almacenamiento hasta la línea de lavado. El sistema de lavado genera en una fase previa de limpieza mediante (i) limpiadoras que utilizan corrientes de aire (sopladoras) que retiran tierra, piedras, hojas y hierba entre otros, posteriormente (ii) una criba vibratoria, conocida también como despalilladora, se encarga de retirar el resto de los materiales de mayor peso y para finalizar (iii) lavadoras que utilizan agua como medio de solubilización y eliminación de los cuerpos más pesados (Pariente Gómez, 2016). También en algunas almazaras se ha llegado a sustituir el sistema de lavado de la aceituna por inmersión por un proceso de ducha en un sistema continuo (para las aceitunas de mayor calidad), en el caso de las olivas de suelo este proceso de ducha por aspersion antes de lavarlo en la lavadora. Este proceso de prelavado es fundamental para no acumular la suciedad de unas aceitunas en otras (Guardia Rubio, 2009).

2.2.2. Línea operación

2.2.2.1. Molienda o Molturación

La finalidad de esta etapa es la rotura del fruto para obtener una pasta de la que se extraerá la fase oleosa (Fernández Orío, 2012). El sistema de cabezales rompe los tejidos vegetales permitiendo la salida de gotas microscópicas de aceite que poco a poco se van adhiriendo a otras y formándose gotas más grandes (Iglesias Loredo, 2019).

La molienda se realiza mediante molinos de piedras o “empiedro”, molino continuo con rodillo de piedra (tradicionales), o molinos de martillos o de discos dentados metálicos (instalaciones modernas) (Cerretani, Gómez Caravaca and Bendini, 2009). Existen variantes de tipo mixto, con molienda previa en empiedro y posterior paso por molino - homogeneizador de cuchillas o dientes (CAR/PL, 2000).

2.2.2.2. Batido

La etapa del batido de la pasta de aceituna es previa a la separación de fases, una de las etapas más importante en cuanto a rendimientos y calidad de los aceites que más influye en los resultados finales (Aguilera *et al.*, 2010), sobre todo en los procesos de transformación más modernos como los sistemas continuos (Cerretani, Gómez Caravaca and Bendini, 2009). y a una temperatura adecuada prepara la pasta o masa para favorecer la rotura de la emulsión agua-aceite formada durante la molienda (CAR/PL, 2000). Tiene como finalidad la aglutinación al máximo de las partículas de aceite originadas en el proceso de molturación, la masa se inserta en un tambor horizontal con ayuda de la temperatura y del volteo mediante las paletas agitadoras, en una fase continua que facilite su separación del resto de los componentes de la masa (Beltrán Maza *et al.*, 2006), siendo de vital importancia sobre todo en los procesos de elaboración más modernos (Pariente Gómez, 2016).

Las dos variables fundamentales de esta etapa de batido son el tiempo y la temperatura. Los mejores rendimientos industriales se consiguen mediante un aumento de la temperatura y un mayor tiempo de batido (Aguilera *et al.*, 2010). El objeto de calentar la masa es el de disminuir la viscosidad del aceite facilitando la formación de la fase oleosa y su extracción. Otra variable a controlar sería la necesidad de adicionar coadyuvantes tecnológicos, con la correspondiente autorización vigente (Pariente Gómez, 2016)

Como límites de temperatura no debe sobrepasar más de 27 °C porque afectaría a la calidad del aceite. Esto se consigue gracias a una camisa interior por donde circula agua caliente. El proceso de no debe ser superior a 60 minutos. Por encima de este tiempo se sabe que se forman emulsiones y existe pérdida de polifenoles y aromas (Iglesias Loredó, 2019).

El uso de ultrasonidos para pretratamiento en continuo de la masa de aceituna es común, cuando los ultrasonidos de alta potencia son aplicados a un medio sólido-líquido provocan, entre otros efectos, un calentamiento del medio debido a las rápidas y continuadas compresiones y expansiones de éste; al mismo tiempo, estas expansiones y compresiones originan un “efecto esponja” (Mulet *et al.*, 2003), haciendo que los líquidos se muevan a través de los microcanales originados por las partes sólidas.

2.2.3. Línea de separación sólido-líquido y línea de separación líquido-líquido

Posteriormente al batido, se procede a separar las partes sólidas y líquidas de la pasta, mediante diversos métodos de separación que han ido evolucionando con los años desde el (i) prensado, (ii) la centrifugación con tres salidas y (iii) la centrifugación con dos salidas, entonces, la parte líquida resultante será tratada con métodos de separación líquido-líquido para separar el aceite de oliva del agua sucia que ha habido durante el proceso. Estos métodos de separación son posibles mediante un decantador y en los sistemas más modernos una centrifugadora vertical. Cada uno de estos sistemas tienen sus ventajas y desventajas es por ello por lo que se procederá a su correcta explicación a continuación:

2.2.3.1. Método de prensado

La mecánica del sistema a presión se ha de realizar con una carga limitada procedente de la molienda con molinos de piedra, es por ello por lo que se trata de un proceso discontinuo de obtención de aceite. Esta operación tiene una duración de 15 a 30 minutos de mezcla continua que favorece la unión de las gotas de aceite facilitando así la separación en las etapas siguientes, debido a esto en este tipo de sistemas la etapa de batido no es duradera, ya que se presenta como una operación secundaria (Cerretani, Gómez Caravaca and Bendini, 2009).

La operación por prensado consta de 3 etapas: (i) la etapa de formación del cargo, (ii) el prensado y (iii) el descapachado.

La pasta sólida resultante del batido se extiende por finas capas sobre discos de material filtrantes mediante una

dosificadora, denominados capachos. La dosificadora puede estar automatizada. Los capachos son apilados unos encima de otros en una vagoneta y guiados por una aguja central. Dicho conjunto recibe el nombre de cargo. Entonces, se someten al prensado mediante una prensa hidráulica. Cada 3 o 4 capachos se coloca una bandeja metálica y una tela para conseguir una presión más uniforme y estable (García Saavedra, 2014). La fase líquida va drenando a través de los orificios de la bandeja metálica y la tela con una presión generada gradualmente entre 300-500kg/cm² dependiendo de la madurez y tipo característico de las aceitunas (Niaounakis, 2006). Esta presión es ejercida por un grupo de bombas hidráulicas, alojadas en la llamada caja de bombas; mientras tanto la fase sólida permanece retenida entre los capachos. A lo largo de este proceso la presión va aumentando de manera gradual durante unos 20 minutos hasta que alcanza un máximo, que se mantiene aproximadamente durante una hora. Es en esta fase donde se obtiene el líquido de la primera extracción, representando hasta un 60% de la fracción total que se obtiene finalmente (CAR/PL, 2000).

Al principio, se obtiene un mosto rico en aceite que irá variando de calidad dependiendo de la presión ejercida durante la extracción. Una vez se ha realizado el prensado la fase líquida es llevada a depósitos para una decantación natural donde se separará la fase acuosa de la fase oleosa, obteniéndose alpechín y aceite de oliva que en el caso de que cumpla con los parámetros químico-físicos y organolépticos que la ley prevé para las categorías “virgen” y “virgen extra”, podrá utilizarse directamente para el consumo humano (Sánchez Muniz, 2009). La ventaja de usar este proceso de extracción está relacionada con los bajos costes de los equipos utilizados y el pequeño volumen de agua residual producido (40 a 55 L/100 kg aceitunas) (Fiorentino *et al.*, 2003). Un campo de estudio actual con el fin de optimizar y mejorar el proceso de producción del aceite es el de la utilización de una centrifugadora vertical para separar el aceite del alpechín, de acuerdo con una diferencia de densidad reemplazando la aceleración gravitacional por una aceleración centrífuga que es mucho más rápida, como factor negativo provoca un mayor efecto de oxigenación del aceite (Masella *et al.*, 2009). Como posibles alternativas modernas está (i) la realización de la centrifugación vertical bajo una capa de gas inerte (Masella *et al.*, 2012), (ii) la eliminación de oxígeno disuelto mediante un lavado de nitrógeno gaseoso (stripping) en el aceite justo después de la centrifugación vertical (Guerrini *et al.*, 2018) y (iii) un acoplamiento directo del decantador con la filtración sin la centrifugación vertical (Fortini *et al.*, 2015).

Por último, se procede a la operación de descapachado donde una vez que se ha retirado el residuo sólido se comienza el lavado y limpieza de los capachos que debe realizarse con sumo cuidado para asegurar la completa eliminación de partículas que hubieran podido quedar atrapadas en el tejido. Una mala limpieza podría repercutir en la calidad sensorial del producto final. Con unas condiciones de humedad y temperatura se generarían procesos hidrolíticos y oxidativos (una fermentación), llevando a la aparición de una alta acidez y mal sabor en productos posteriores (CAR/PL, 2000).

El residuo seco de los capachos, es el orujo, con una humedad media de 25-30% según Béjar Heredia, (2012) y un contenido graso del 8%. El 91.4% de la utilización de este producto va dirigido a las extractoras (Callejo López, Parra Heras and Manrique Gordillo, 2015), que mediante un previo secado extraen con disolventes orgánicos el aceite de orujo. El método prensado genera un residuo seco con menor humedad media respecto a los métodos continuos de tres y dos fases reduciendo de manera consistente el tiempo de secado que debe realizarse posteriormente en la orujera. El salto temporal de la producción de aceite de forma discontinua a continua tuvo lugar hace aproximadamente 45 años (Sanchez Moral and Ruiz-Méndez, 2006), al no poder ser automatizado el proceso de forma completa es necesaria la inversión de altos costes en mano de obra en la mayoría de los procesos discontinuos (Giovacchino, Sestili and Vincenzo, 2002).

2.2.3.2. Método de tres fases

En el caso del sistema de tres fases la centrifugadora horizontal permite la separación de la pasta en tres fases de salidas (i) aceite con impurezas (fase oleosa), (ii) orujo (fase sólida) con un residuo graso de 6% y una humedad de 48-52% (Béjar Heredia, 2012) y (iii) alpechín (fase acuosa). A diferencia del prensado, con este método se requiere una menor mano de obra, menor espacio de actividad, hay una simplificación mecánica, se eliminan los capachos y su limpieza y se comienza una elaboración en continuo que genera unos ratios más altos de producción, ya que no existe la necesidad de parar la maquinaria durante el procesado. El método de extracción

continua precisa, al igual que el tradicional, de una molienda previa que se realiza en molinos de martillo o de discos (CAR/PL, 2000). Como inconveniente se incrementa las cantidades de agua residual que se produce debido al uso continuado del agua que aumenta de 1.25 a 1.75 veces más. Este agua residual vegetal es el denominado alpechín o jamila (Niaounakis, 2006) un líquido oscuro, de color rojizo que se degrada rápidamente por una serie de procesos enzimáticos, es un líquido maloliente muy contaminante (CAR/PL, 2000) por el cual a partir de los años 90 los centrifugadores horizontales de dos fases empezaron a operar con el objetivo de reducir la cantidad de agua utilizada en el proceso de extracción de aceite (Alba Mendoza *et al.*, 1996). La pasta ha de diluirse con una cantidad de agua que puede variar entre el 15-20% del total, aun si esto dependerá de la marca comercial que lo procese, el porcentaje puede ser levemente superior a esos valores (Agabo García, 2018). Esta adición de agua es necesaria para facilitar el transporte creando capas de líquido de suficiente espesor para una adecuada separación de fases. La temperatura no ha de sobrepasar los 35°C pues empeoraría las condiciones de la producción con una peor calidad del aceite (García Saavedra, 2014).

A pesar del gran consumo de agua que se necesita en el sistema de 3 fases y las cantidades de alpechín que producen, aun está ampliamente extendido en muchos países como Grecia, Italia y Portugal (Niaounakis, 2006).

Lozano, (2000) explica los cálculos de dimensionamiento y las técnicas óptimas para el uso del centrifugador horizontal, también denominado decantador centrífugo (haciendo referencia a la técnica tradicional por sedimentación gravitacional). La velocidad de sedimentación de las partículas será mucho mayor en una centrífuga que un campo gravitatorio debido a que las fuerzas de dispersión originadas por el movimiento browniano son mucho mayores que las fuerzas de la gravedad. El centrifugador horizontal que se utiliza en las almazaras consta de un tambor cónico-cilíndrico de eje horizontal que gira a gran velocidad por agitación a alta frecuencia (3000 a 4000 rpm). La pasta procedente de la molienda o del batido mediante una bomba dosificadora de velocidad variable (CAR/PL, 2000) se introduce dentro de tambor mediante un tubo axial (pudiendo ser automatizado), un tornillo sinfín hueco dispuesto dentro del tambor que gira a una velocidad distinta del propio tambor permitiendo con dicho movimiento relativo extraer los sólidos por una salida situada en el lado extremo de menor diámetro del cono. Este cambio de velocidades se consigue gracias a un sistema de poleas y correas (Agabo García, 2018). Un separador en el lado opuesto del cono permite la obtención de las partes líquidas empujadas en el mismo sentido del paso de hélice. La pasta en el interior del tornillo sinfín por medio de la fuerza centrífuga aparecen tres coronas circulares, cuyos radios serán proporcionales a las fuerzas centrífugas originadas gracias a la diferencia de densidades (i) una capa exterior formada por sólidos húmedos de densidad 1,2 g/cm³, (ii) en el centro una capa líquida de densidad 1,08 g/cm³, formada principalmente por agua y (iii) una capa interior, por ser más ligera que contiene la mayor parte de la fracción oleosa de densidad 0,915 g/cm³ (Hermoso Fernández *et al.*, 2001).

El centrifugador horizontal tiene muchas ramas de estudio para poder mejorar su eficiencia para la extracción sin perjudicar en el rendimiento: (i) aumento de la velocidad angular, longitud y radio del centrifugador hasta los límites permitidos por la máquina, (ii) aumento del tiempo de residencia de la pasta en la centrífuga, (iii) aumentar el espesor de la fase ligera (aceite), (iv) añadir agua a la pasta de aceituna con objeto de disminuir la concentración de sólidos, o bien reducir el espesor del anillo de los líquidos y desplazarlo hacia radios mayores sin sobrepasar los límites de arrastre del tornillo sinfín, (v) no aumentar la temperatura demasiado.

Aun así, existen pastas fáciles que rinden su aceite con facilidad, y pastas difíciles, que se extraen con suma dificultad y malos rendimientos todo dependerá del método de actuación que se utilice seleccionado desde su clasificación en la línea de recepción.

Finalmente, la fase líquida oleosa que contiene una pequeña cantidad de alpechín debe ser purificada en una centrífuga vertical mediante agitación a alta velocidad (6000- 7000 rpm) con el objetivo de limpiar el aceite de impurezas que se han separado en la etapa anterior (Hermoso Fernández *et al.*, 2001).

2.2.3.3. Método de dos fases

La gran cantidad de residuos líquidos vegetales procedentes de la producción del aceite de oliva por el método de las tres fases, junto con la cada vez más exigente legislación respecto al tratamiento y gestión de los residuos de almazara en algunos países¹, potenciaron el desarrollo de nuevas tecnologías. Así surgió el nuevo sistema de centrifugación de dos fases el cual se denominó “ecológico”. Aun así dicha implementación no solo se ha debido al ahorro de agua y la eliminación sustancial de los alpechines, también por una construcción más sencilla del centrifugador horizontal de dos fases, un rendimiento y una capacidad de producción de aceite superior, una calidad del aceite “diferente” en relación con su resistencia a la oxidación y un coste de operación menor (CAR/PL, 2000).

Para la separación sólido-líquido se empleará el centrifugador horizontal de dos fases que permite la elaboración del aceite de oliva virgen sin la necesidad de adicionar agua caliente al “decanter” (centrifugador) (CAR/PL, 2000). Existe un ahorro de agua lo que supone una menor producción del alpechín (García Saavedra, 2014) y con ello, un menor presupuesto, menor energía y un uso menor de la caldera para calentar el agua introducida (Roig et al. 2006). Siendo la razón principal por la que prácticamente no se producen alpechines.

En este proceso se generan coronas circulares con dos corrientes a la salida, (i) alperujo (una fase sólida y líquida más densa) de humedad 55-60% y contenido graso 6% según Béjar Heredia, (2012) y (ii) aceite con impurezas (una fase oleosa menos densa). Normalmente en el caso del proceso de dos fases las compañías de la industria oleica han elaborado un centrifugador horizontal mucho más largo para hacer más larga la ruta de los sólidos, aumentado las revoluciones por minuto del tornillo sinfín y poniendo un diafragma en la zona cónica para retener el aceite (Agabo García, 2018). El alperujo será conducido mediante el tornillo sinfín hacia una tolva de almacenamiento en la zona externa de la almazara, donde será almacenada a la espera de un adecuado tratamiento (Fernández Orío, 2012).

La centrifugación de la pasta de aceituna es la operación básica más compleja dentro del proceso de extracción del aceite de oliva y donde se han producido mayores cambios tecnológicos (Lozano, 2000). En la actualidad donde mayores estudios y cambios se están produciendo es en los procesos de pretratado de la pasta de aceitunas como es el caso del batido, molturación, también en etapas intermedias al decanter como el tamizado, y la centrifugadora vertical, existiendo estudios para la perfección de estos procesos y la incorporación de nuevos métodos (Devon Barry, Chiara Barbiero, Cedric Briens, Franco Berruti, 2018), (Beltrán Maza, Jiménez Marquez and Aguilera Herrera, 2006), (Cortés Delgado, 2013), (Guerrini *et al.*, 2018).

La separación líquido-líquido del aceite se realiza mediante un tamiz vibratorio se realiza el tamizado, donde la misión es retener entre las mallas filtrantes las partículas de mayor tamaño que traiga consigo, evitando la colmatación del equipo de separación y limpieza del aceite y con ello aumentado el rendimiento del equipo y la calidad del aceite (Guardia Rubio, 2009). Aún realizado el tamizado todavía quedan impurezas y agua de vegetación en la corriente del aceite y es aquí donde se utiliza la centrifugadora vertical como medio final de separación, el aceite con impurezas se centrifuga junto con una proporción de agua que no debe sobre pasar los 30°C (Fernández Orío, 2012) que facilita la formación en su interior de dos anillos a diferente densidad (CAR/PL, 2000).

Como ocurre en el sistema de tres fases con el alpechín, con el sistema de dos fases debido al gran volumen de producción de aceite de oliva en España también se generan grandes cantidades de alperujo que requieren de una gestión y un tratamiento posterior (Pariente Gómez, 2016). Con las encuestas realizadas por Callejo López, Parra Heras and Manrique Gordillo, (2015) se sabe que a partir de aquí existen tres opciones donde se destina el alperujo (i) usarlo para la fabricación de compost (2,8%), (ii) enviarlo a una central de biomasa para generación eléctrica o para cogeneración (5,6%) y, por último, (iii) destinarlo a una extractora que extraiga parte de la cantidad de aceite que aun posee obteniendo aceite de orujo como producto (91,6%).

¹ Prohibición en España del vertido en cauces públicos de los alpechines,1983.

2.2.4. Comparativa de los métodos de extracción

Finalmente, en la Tabla 1 se hace una comparativa de los métodos de extracción descritos anteriormente.

		Sistema discontinuo		Sistema continuo			
		Sistema de Presando		Sistema de tres fases		Sistema de dos fases	
Mano de obra	Formación manual de cargos	Formación automática de cargos		Producción baja	Producción alta (75/24h)	Producción baja	Producción alta (75/24h)
		Descapachado manual	Descapachado automático				
	2-2.5 h/t	1-1.25 h/t	0.75-1 h/t	1 h/t	0.3 h/t	1 h/t	0.3 h/t
Consumo de agua	270-350 L			750-1000L		250-330L	
Alpechín producido	650L/t de aceituna			1200L/t de aceituna		250L/t de aceituna	
Humedad del orujo /alperujo	25-30%			48-52%		55-60%	
Ventajas	Separación sólido-líquido Procesado en frío Orujos más secos Menor consumo de agua caliente			Eliminación del riegos de fermentación con los capachos Corto contacto del aceite con el alpechín Maquinaria reducida y de fácil automatización		Reducción del consumo de agua Menor cantidad de agua caliente (Ahorro energético) Mayor automatización y reducción de dificultad del decanter Garantización de higiene y se elimina el riesgo de fermentación	
Desventajas	Discontinuidad del proceso Alto coste mantenimiento y gran cantidad de mano de obra Tiempo elevado de contacto del aceite con el alpechín			Gran consumo de agua y gran cantidad de alpechín Reducción de antioxidantes del aceite Alto coste de inversión Sabor "diferente"		Altos costes de inversión Orujo con más humedad Necesidad de mano de obra cualificada Reducción de antioxidantes del aceite	
Ventajas	Separación líquido-líquido Baja regulación de la temperatura del procesado En caso de que tenga la centrifugación vertical mayor nivel de automatización del proceso			Rapida separación del aceite con el alpechín Menos acidez y mejor aprovechamiento del producto Menor espacio de actuación Automatización			
Desventajas	Necesidad de una gran numero de pozuelos y un gran espacio de trabajo En caso de que tenga la centrifugación vertical mismo inconvenientes que en el sistema continuo			Pérdida de aromas y estabilidad Inconveniente con la centrifugación vertical (mayor oxigenación del aceite)			

Tabla 1 Comparativa de los procesos en la almazara

Fuente: Elaboración propia con información extraída de (CAR/PL, 2000) (Béjar Heredia, 2012) (García Saavedra, 2014) (Agabo García, 2018)

2.3. La orujera

2.3.1. Línea de obtención del aceite de orujo crudo

La actividad de las industrias extractoras consiste en la extracción de aceite de orujo de oliva crudo, a partir del orujo graso procedente de la producción del aceite de oliva en la almazara. La idea primordial en las extractoras, o como otros llaman "orujeiras", es el secado; hay que mezclar previamente los alperujos procedentes de las almazaras para así conseguir que la humedad conjunta disminuya. El tipo de orujo dependerá del tipo de aceitunas y del método de producción que se pone en práctica en las almazaras (Béjar Heredia, 2012). En España existen 66 orujeiras operativas de la campaña 2020-2021 que producen aceite de orujo de oliva crudo, el 78% de los procedimientos se han realizado mediante métodos químicos y el 22% por medios físicos (AICA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2021).

El procedimiento físico implica el uso de centrifugadoras horizontales que se usan al comienzo del proceso para someterlo a una segunda extracción de aceite. Se extraen entre el 40% y el 60% de aceite de orujo (Béjar Heredia, 2012), agotando hasta un 2-3.5% de su contenido graso. El método más utilizado de extracción de aceite de orujo consiste en una combinación de centrifugación y extracción con hexano.

El procedimiento químico se basa en una extracción sólido-líquido en la que el aceite de orujo es extraído utilizando un disolvente orgánico como es el hexano; una fase previa de remolienda, dos fases de secado y la última de extracción. La clave del diseño de una extractora es establecer una buena secuencia de operaciones físico-químicas (Iglesias Loredo, 2019).

La extracción del orujo se realiza en discontinuo, obteniendo el orujillo. Se realizará una valorización del orujillo mediante pirólisis en la resolución del proyecto para aprovechar mediante la economía circular los subproductos de la aceituna y la producción de aceites. Es importante señalar que para separar el disolvente del aceite se realiza una destilación y se obtienen vapores y aceite de orujo bruto, los cuales posteriormente se deben de refinar (Béjar Heredia, 2012).

2.3.1.1. Recepción

El alperujo procede de las almazaras y se almacena en balsas estancas impermeabilizadas con el fin de reducir el alto contenido en humedad y homogeneizar el alperujo, haciendo que el coste del secado sea un poco menor. Es necesario un sistema para transportar desde las balsas hasta la zona del secadero mediante el tornillo sinfín, las cintas transportadoras y las tolvas (Béjar Heredia, 2012); del secadero a la planta extractora se realiza mediante las tolvas y las cintas que transportan el orujo seco. El hexano u otros disolventes se encuentran en cisternas aisladas alejadas de la instalación de secado debido a las normas de seguridad que se aplican en los productos altamente inflamables.

Las balsas de evaporación contienen diferentes características, las cuales se encuentran en la Figura 4: el deshuesado o desapelmazado, el secado, el macerado o la molienda y granulación, la extracción, la destilación y, por último, la desolventizadora. A continuación se explicará brevemente lo que Béjar Heredia (2012) expone en su libro de cada una de estas fases.

2.3.1.2. Desapelmazado, secado y macerado.

Con la deshuesadora se extrae el hueso de la aceituna de la masa del orujo, obteniendo así un combustible de poder calorífico que ronda los 5000 kcal/kg, teniendo un tamaño similar y con una humedad del 15% al 25%. Durante el secado, el orujo llega a la orujera con una humedad en torno al 50%-70%, según el sistema que se haya utilizado en la almazara, por lo cual es necesario reducir hasta un 8%-10% la humedad; esta es la humedad óptima para la extracción. El secado se realiza a muy bajas temperaturas de funcionamiento a la entrada del orujo en un trómel, es decir la temperatura rondaría entre los 450-470°C (Béjar Heredia, 2012).

Durante la fase de maceración, también llamada molienda y granulación, el orujo ya seco tiene que molerse para poder obtener el tamaño de partícula idóneo y granularlo para conseguir una mayor extractabilidad (Béjar Heredia, 2012).

2.3.1.3. Extracción, destilación y desolventizadora.

Tras la fase de maceración, el orujo seco se pasa a una planta de extracción en continuo donde se introducirá en el extractor en el cual se pasa por hexano a contracorriente. El orujo lixiviado que sale de aquí contiene un 0.5% de aceite. El aceite extraído junto con el hexano es lo que compone la miscela. El proceso de extracción completo se divide en dos fases: la extracción del aceite de orujo grasoso seco y la desolventización, es decir, la extracción del disolvente del orujo seco extractado. En la desolventización se realiza la recuperación del solvente de la materia sólida (orujo) al máximo (Béjar Heredia, 2012).

En la destilación se trata la miscela en columnas de rectificación en continuo para poder separar el aceite de orujo del hexano (disolvente), cuyo elemento puede volver a utilizarse (Béjar Heredia, 2012). Por último, en la desolventizadora se elimina el disolvente, es decir, el hexano. El orujo extractado puede contener pequeñas cantidades de este disolvente el cual es necesario eliminar con arrastre con vapor de agua.

Lo que se pretende obtener del proceso de obtención de aceites de orujo de oliva es (i) reducir los orujos procedentes de las almazaras, (ii) extraer el aceite que contienen los orujos, (iii) disminuir la humedad de los alperujos u orujos de dos fases, (iv) obtener otros subproductos con valor añadido (orujillo) (Béjar Heredia, 2012).

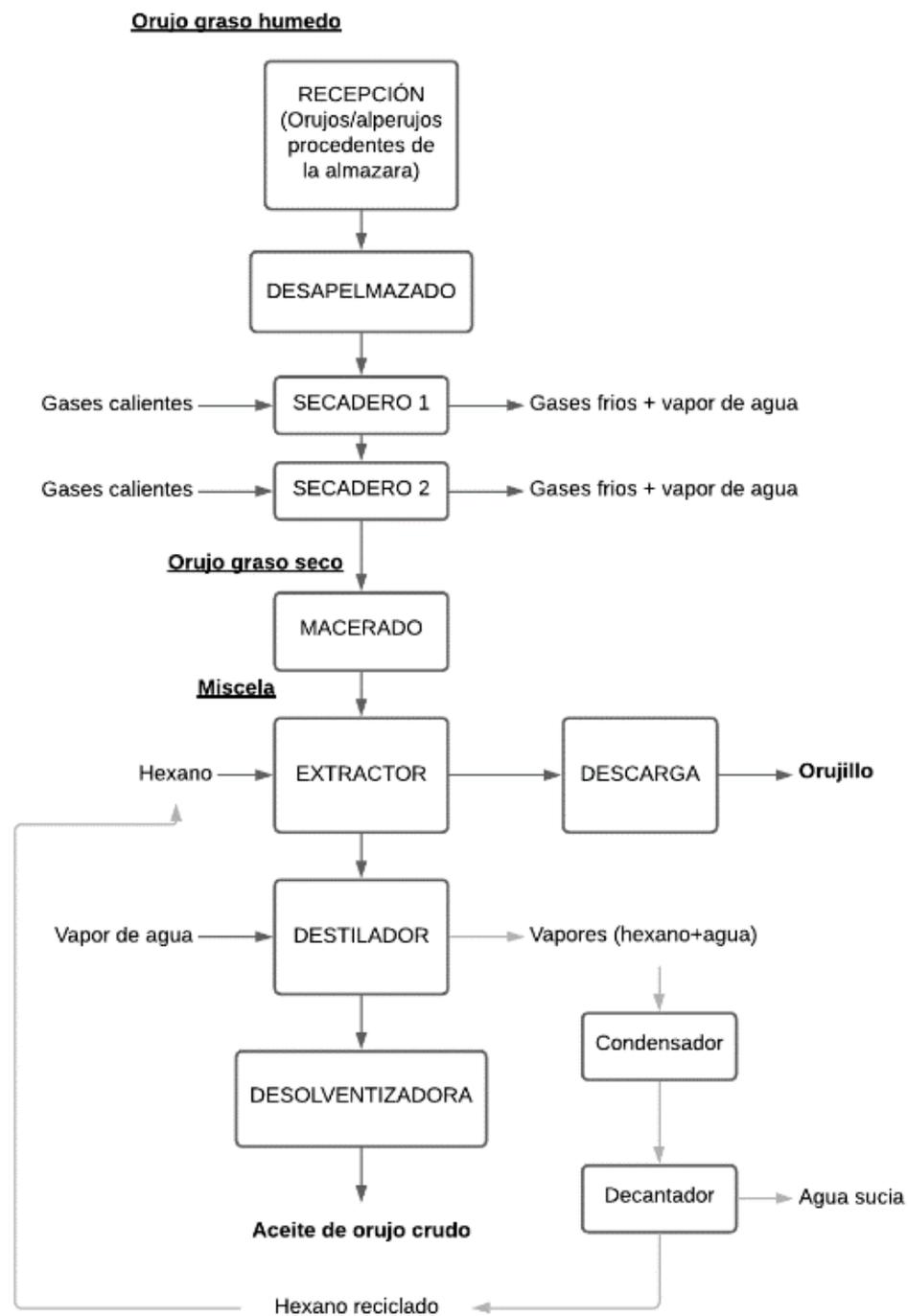


Figura 4 Diagrama de procesos de una extractora

Fuente: Elaboración propia con información extraída de Béjar Heredia, (2012).

3. INTRODUCCIÓN A LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

3.1. Alternativas para la valorización energética de residuos

3.1.1. Valorización energética

A partir de este punto de la memoria se dejará atrás el proceso de producción del aceite de oliva y se enfocará un punto de vista más técnico con el residuo procedente de las orujeras, el orujillo. Este trabajo intentará abarcar la valorización energética de una central de biomasa cuyo objetivo sea la producción de bio-char. Un carbón vegetal que se obtiene tras la pirólisis, con el mismo poder calorífico equivalente que la mayoría de los carbones bituminosos convencionales, usable como compost en suelos, fertilizantes naturales, captación de CO₂, agente secuestrador de toxinas en alimentación animal, transformación a carbones activos y una utilización como combustible mediante combustión para producción energética que produce menores emisiones de SO_x y NO_x que los carbones minerales convencionales (Urien Pinedo, 2013).

3.1.2. Conversiones termoquímicas

Una conversión termoquímica es un proceso que produce combustibles y productos químicos de interés a partir de materias primas bio-renovables. En general, la biomasa presenta una composición química muy adecuada para el aprovechamiento termoquímico, estando compuesta por carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno careciendo prácticamente de azufre, presentando además un elevado porcentaje en materia volátil, muy bajo en cenizas y un elevado poder calorífico.

Los procesos más usuales son la combustión (a), la gasificación (b) y la pirólisis (c) y su principal diferencia se da en la atmósfera en la que se llevan a cabo (La cal herrera, 2013). Existen otras alternativas como la licuefacción (d) o el tratamiento hidrotérmico (e), pero son menos habituales. Cada proceso de conversión conduce a unos productos diferentes (según se muestra en la Figura 5) y es ahí, donde dependiendo de la finalidad se utilizará un proceso u otro (Urien Pinedo, 2013). Mediante la información obtenida por (La cal herrera, 2013), (Urien Pinedo, 2013) y (Barry et al., 2019) se han expuesto las siguientes definiciones.

(a)- La combustión es el proceso más desarrollado y difundido para el aprovechamiento energético de la biomasa y consiste en su oxidación completa, a partir de unas temperaturas alrededor de 800-1000°C transformando biomasa en gases muy calientes, por medio del oxígeno contenido en el aire, liberando agua y dióxido de carbono. Como residuo se obtienen cenizas por componentes no combustibles y productos de la combustión incompleta. Solo es posible combustionar biomasa con una humedad inferior al 50%. Las aplicaciones de la combustión se pueden dar a pequeña escala para calefacción o en grandes plantas industriales, también la co-combustión en las centrales eléctricas de la biomasa junto al carbón es la opción más atractiva por su alta eficiencia, con el tiempo esto está cambiando debido a la inmensa cantidad de emisiones que se producen. Las principales variables que intervienen en la combustión son la temperatura, el tiempo y la turbulencia. Las tecnologías de combustión más empleadas son lecho fijo o parrilla y lecho fluidizado.

(b)- La gasificación es una combustión incompleta (oxidación parcial) que se produce al someter a la biomasa con aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas (800-1000°C). Como resultado de esta se obtiene un gas sintético de 4-6 MJ/Nm³ que puede ser quemado directamente o utilizado como combustible para motores de gas y turbinas tras un previo tratamiento y limpieza. Como resultado de este proceso se busca la generación de energía térmica

mayoritariamente en el vapor y posteriormente una generación eléctrica. Existen distintos tipos de gasificadores, los cuales se clasifican en función de cómo se relacionan en el interior del gasificador el flujo del agente gasificante y los sólidos, con tres configuraciones típicas: updraft, downdraft y lecho fluidizado.

(c)- La pirólisis es la conversión termoquímica que descompone la materia orgánica por medio de la aportación de energía en forma de calor en una atmósfera inerte o en el vacío. Los productos de la pirólisis son el bio-oil en estado líquido, el syngas o bio-gas en estado gaseoso y el carbón vegetal o char como residuo carbonoso sólido. Dependiendo de las temperaturas y estacionalidad de la materia, la composición de los productos de salida será variable favoreciendo unas aplicaciones u otras. Existen diferentes tipos de pirólisis en función de la estructura y composición de la materia prima, la tecnología utilizada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso. Como se puede observar en la Tabla 2.

PROCESO	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRODUCTOS
CARBONIZACIÓN	Días	Muy lenta	400	Bio-char
CONVENCIONAL	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
RÁPIDA	0,5-5 SEG	Muy rápida	650	Bioaceites
FLASH (LÍQUIDOS)	< 1 seg	Rápida	< 650	Bioaceites
FLASH (GAS)	< 1 seg	Rápida	< 650	Químicos y gas
ULTRARÁPIDA	< 0,5 seg	Muy rápida	1000	Químicos y gas
VACIO	2-30 seg	Media	400	Bioaceites
HIDROPIRÓLISIS	< 10 seg	Rápida	< 500	Bioaceites
METANOPIRÓLISIS	< 10 seg	Rápida	> 700	Químicos

Tabla 2 Tipos de pirólisis

Fuente: Urien Pinedo (2013)

(d y e)- Otros procesos son: la licuefacción, una conversión a baja temperatura y presiones elevadas de hidrógeno, en hidrocarburos líquidos y estables. Su interés es bajo debido a que los reactores y sistemas de alimentación de combustibles son muy complejos y económicamente menos rentables que los procesos de pirólisis. Y el tratamiento hidrotérmico (HTU: Hydro Thermal Upgrading): que convierte la biomasa en un ambiente húmedo a alta presión, en hidrocarburos oxigenados.

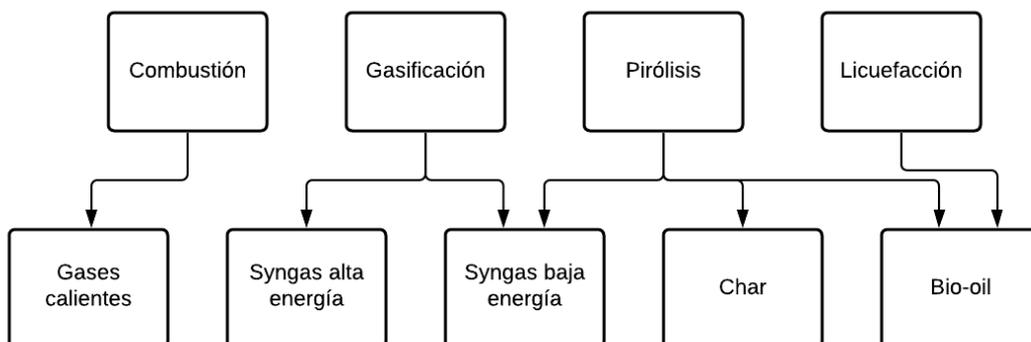


Figura 5 Productos de las conversiones termoquímicas

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Valorización escogida

Lo más interesante acerca de la biomasa es su utilización como elemento residual y excedente agrícola para usar su energía de la forma más respetuosa posible con el medio. En nuestro caso la biomasa utilizada es el nombrado orujillo procedente de las orujeras como residuo del proceso de la producción de aceite de orujo crudo. La valorización del proceso consiste en encontrar nuevas vías de aprovechamiento energético de estos residuos (ahora llamados subproductos) y mediante los procesos de conversión termoquímica escogidos maximizar la producción de un producto definitivo mediante la generación eléctrica, térmica u otras aplicaciones. A raíz de lo ya nombrado anteriormente se puede comprobar que la pirólisis es un proceso muy interesante que aporta múltiples alternativas a escoger dependiendo de sus valores de diseño.

4. BALANCE DE MATERIA

4.1. Estudio de la producción de orujillo

Antes de comenzar con la central de biomasa propuesta, es necesario comprender que alcance podrá llegar a tener este proyecto. Para ello, se ha realizado un estudio de materia del proceso completo de la aceituna en el sector oleícola para estimar las toneladas de orujillo disponibles para el proceso de valorización propuesto mediante pirólisis. Los datos obtenidos parten de la agencia de información y control alimentario (AICA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2021).

Se sabe que España cuenta con 1825 almazaras distribuidas por 14 comunidades autónomas, dentro de las cuales Andalucía es la que cuenta con mayor porcentaje en industria de almazaras con un 46%, esto corresponde a 847 almazaras activas actualmente; Jaén y Córdoba son las provincias de toda España que más cantidad poseen, con 322 y 189 activas respectivamente.

Estos datos corresponden a una media de las campañas de 2016/2017-2017/2018-2018/2019-2019/2020, para la mejor parametrización de los valores se ha decidido situar geográficamente el estudio en Andalucía, procesando todos los datos correspondientes a esta Comunidad Autónoma. En estas campañas se procesaron de media en Andalucía 5.200.000 toneladas de aceitunas de almazara, donde la producción total media de aceite de oliva fue de 1.096.474 toneladas, con un rendimiento del 20,48% respecto a la aceituna de entrada.

Año	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
Producción total (toneladas)	1.059.764	959.697	1.465.129	901.309

Tabla 3 Producción de las campañas de aceite de oliva

Fuente: Elaboración propia con información extraída de (AICA)

Mediante un estudio de la Consejería de agricultura, pesca y desarrollo de Andalucía (Callejo López, Parra Heras and Manrique Gordillo, 2015) se han agrupado numerosas encuestas para estimar el potencial de producción y el potencial energético de los subproductos de las agroindustrias del aceite de oliva. El resultado es el *valor del índice* que relaciona la producción y autoconsumo de subproductos con la cantidad de materia prima procesada. Los índices utilizados se calcularon utilizando los valores medios obtenidos de producción y autoconsumo de subproductos en las campañas 2006/2007 y 2007/2008.

A partir de toda la información recolectada, se ha elaborado una estimación de cada una de las corrientes de salida de los procesos implicados en la producción del orujillo, así como los porcentajes que suponen cada una de ellas procedentes de los valores índices. Todos los datos se detallan en la Figura 6 y la Figura 7.

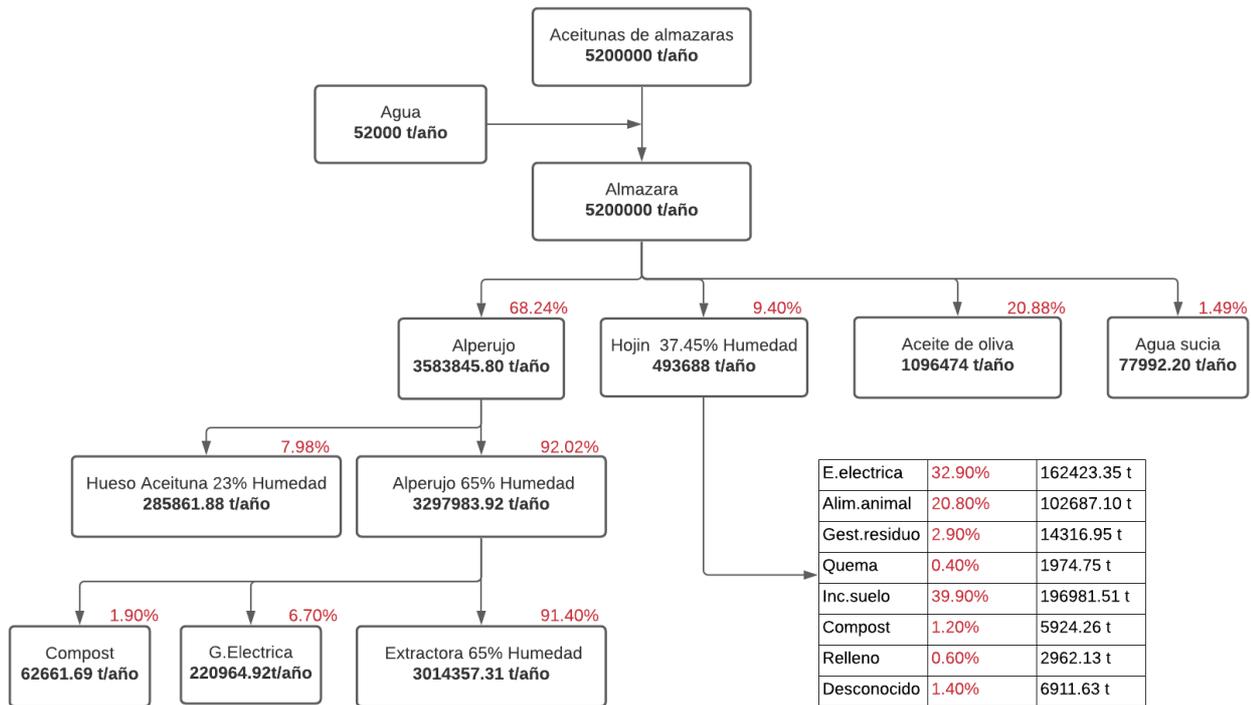


Figura 6 Estimación de las corrientes de salida de los procesos implicados en la producción del orujillo

Fuente: Elaboración propia con datos calculados con los valores índices de Callejo López, Parra Heras y Manrique Gordillo (2015)

El valor medio de aceitunas que se procesan en las almazaras es 5.200.000 toneladas anuales. Teniendo constancia de la adicción de agua, se sabe que se produce 1.096.474 toneladas anuales de aceite de oliva en Andalucía con un rendimiento del 20,88% respecto al total en las almazaras. Como subproducto de este proceso se generan 493.688 toneladas anuales de hojín (37,45% humedad) y 3.583.845,80 toneladas de alperujo anuales (65% humedad).

El hojín se emplea principalmente en un 32,90% para generación eléctrica o cogeneración, 20,80% alimentación animal y un 39,9% para la incorporación directa a los suelos. En las mismas almazaras se extrae parte del alperujo dando como resultado 285.861,88 toneladas anuales de hueso de aceituna (23% humedad) y una cantidad de alperujo, tras la extracción del hueso de aceituna, de 3.297.983,92 toneladas anuales.

Esa cantidad de alperujo se dirige a tres procesos: generación eléctrica y cogeneración en un 6,70%, compost en un 1,90% y mayoritariamente se destina a las extractoras para la obtención de aceite de orujo de oliva en un 91,40%.

Continuando con los balances correspondientes para la industria extractora, obtendríamos las corrientes y los datos representados en la Figura 7.

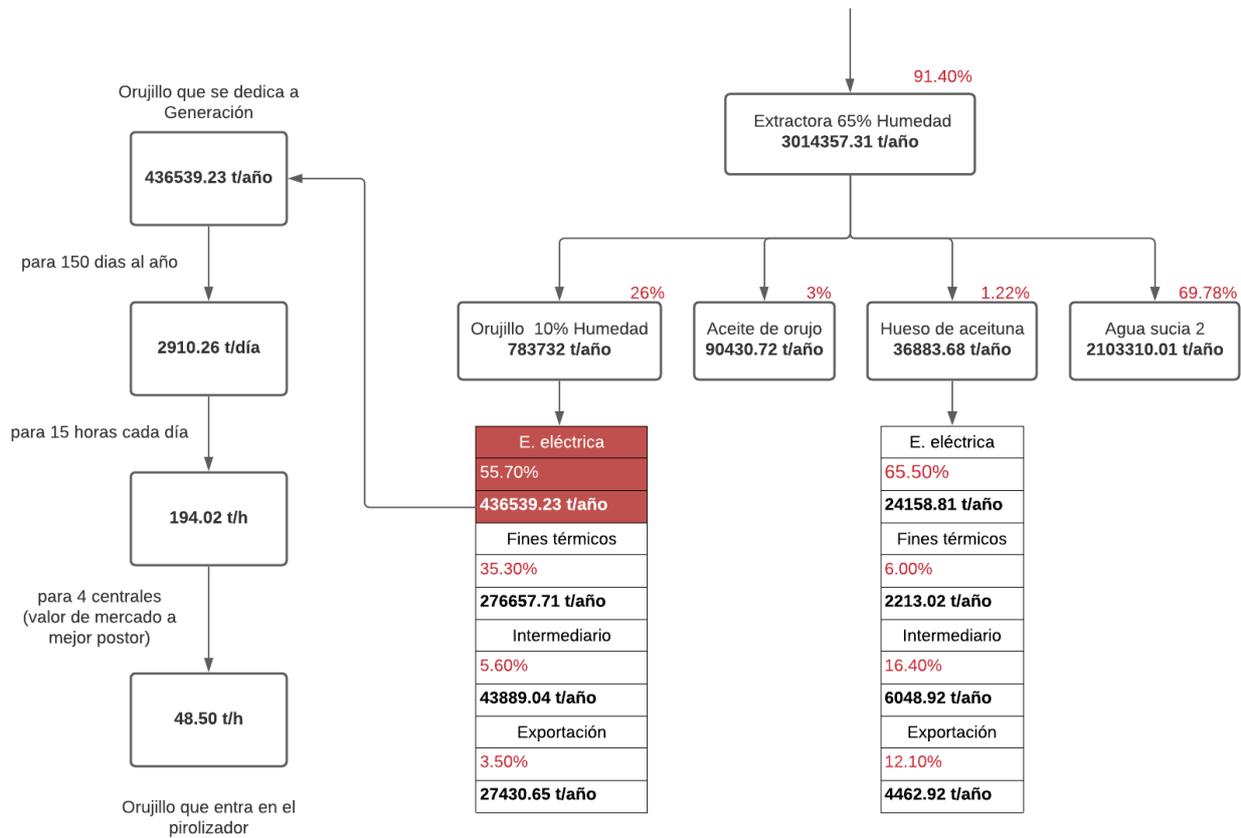


Figura 7 Estimación de las corrientes de salida de los procesos implicados en la producción del orujillo II

Fuente: Elaboración propia con datos calculados con los valores índices de Callejo López, Parra Heras y Manrique Gordillo (2015)

Una vez en las extractoras se genera 90.730,72 toneladas anuales de aceite de orujo crudo como producto del proceso, los cuales llevarán a las refinadoras para extraer al máximo su potencial. Como subproducto de los procesos físicos y químicos se extraen 36.883,68 toneladas anuales de hueso de aceituna con un 1,22% de rendimiento debido a que anteriormente en la almazara ya se había extraído gran parte y 783.732 toneladas anuales de orujillo (10% de humedad) lo que representa un 26% del alperujo de entrada.

El 65,50% del hueso de aceituna total se emplea en generación eléctrica y cogeneración, un 16,40% en procesos intermediarios y un 12,10% se exporta. Por otro lado, un 35,30% del orujillo con fines térmicos en procesos industriales a baja temperatura o climatización y un 55,70% se emplea principalmente en generación eléctrica y cogeneración dando 436.539,23 toneladas de media se consumen al año.

A partir de aquí, se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- (i) el año de generación eléctrica abarca 150 días,
- (ii) en cada día se pirolizará en 15 horas de funcionamiento y
- (iii) 4 centrales de biomasa se reparten la cantidad proporcional del orujillo producido.

Como resultado final 48,50 toneladas brutas de orujillo entrarían en el proceso de pirólisis propuesto, que suponiendo unas pérdidas en el transporte de un 1%, suponen 48 toneladas netas anuales.

Valorando el resultado expuesto, la cantidad de orujillo dependerá de varios factores: (i) la zona de cultivo de la aceituna y la procedencia del orujillo, (ii) la estacionalidad de la materia prima, dado que el orujillo se genera en una época del año concreta comprendida entre octubre y febrero, y (iii) la variabilidad de la cantidad generada entre esos meses. Por ello, en la central de biomasa por pirólisis que se verá en el siguiente apartado se deberá tener un control exhaustivo de la cantidad de orujillo que entra, y a ser favorable que se pueda variar la cantidad de orujillo recibido en cualquier situación, esta cantidad se podrá predecir aproximadamente con el estudio de

anteriores campañas.

Con el fin de contemplar todos los resultados posibles se considerará en la entrada del pirolizador tres cantidades disponibles valorando la diferencia entre los meses de mayor y menor producción de orujillo. Estas serán 20t/h para el mes más desfavorable, 48t/h como punto medio y 70t/h como mes más favorable.

5. OBJETIVOS DEL TFG

Por tanto, el objetivo principal del TFG es la optimización del proceso de valorización energética del orujillo mediante un proceso de pirólisis. Para ello, se realizará el estudio técnico del proceso y se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Modelizar el proceso de manera que permita estudiar los rendimientos, composiciones químicas y poder calorífico inferior de los productos obtenidos de la pirólisis bajo diferentes condiciones de operación. Bio-oil, Syngas y Char.
2. Desarrollar un sistema simplificado de ahorro energético y estudiar las diferencias generadas respecto al caso base del proceso.
3. Contemplar las posibles aplicaciones en la industria de la salida de productos obtenida durante la pirólisis y la caldera.
4. Señalar una localización adecuada donde se pueda dar una sostenibilidad económica del proyecto.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO MEDIANTE PIRÓLISIS

En la Figura 8 se representa el diagrama del proceso de valorización energética mediante pirólisis para el orujillo, cuyo objetivo es obtener un biochar como producto principal.

Como se observa en la figura 8, el orujillo entra en el pirolizador (en este caso, sería un horno rotatorio), donde se piroliza a la temperatura seleccionada. La energía necesaria para el proceso se obtiene gracias a la combustión del gas natural, que tiene lugar en la cámara que rodea al pirolizador, obteniendo unos gases de la combustión del gas natural que se encuentran a una temperatura en torno a 650-800°C. Del pirolizador se obtiene una corriente de char, que es el producto principal del proceso y una corriente de syngas (gases condensables y no condensables formados durante la pirólisis). Esta corriente de syngas, se puede aprovechar en una caldera para la obtención de una corriente de vapor, que sería un subproducto del proceso. Finalmente, de la caldera sale la corriente de gases de combustión del syngas.

El objetivo del TFG consiste en modelizar dicho proceso bajo diferentes condiciones de operación (temperatura y caudal de alimentación), para así estimar las corrientes de salida. Una vez conocido el proceso, se pretende estudiar diferentes alternativas para la optimización energética del mismo, mediante la incorporación de intercambiadores que permitan aprovechar el contenido energético de cada una de las corrientes. Además, también se tendrán en cuenta diferentes aspectos técnicos y económicos para la elección de la mejor alternativa.

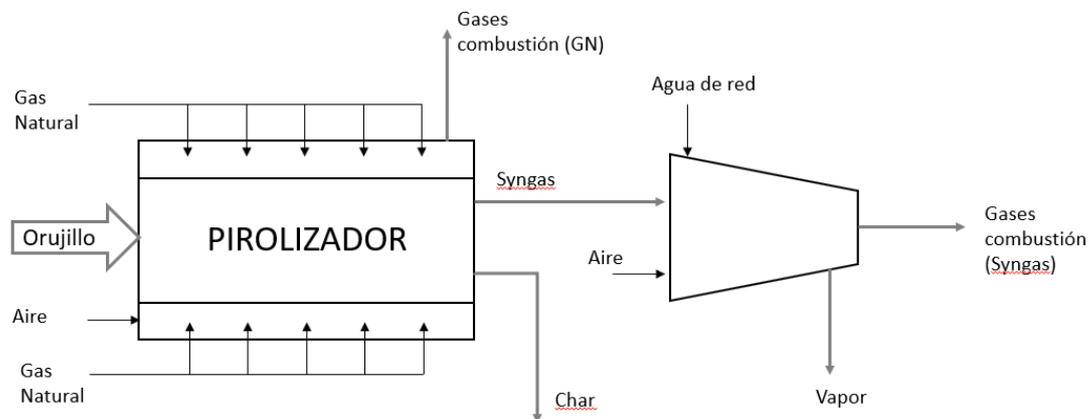


Figura 8 Diagrama del proceso de valorización energética mediante pirólisis

Fuente: Elaboración propia

La modelización de dicho proceso se ha realizado en Excel mediante el programa SteamTab, con el fin de poder estimar todas las corrientes de salida bajo diferentes condiciones de operación y así obtener la alternativa que optimice el proceso propuesto.

6.1. Pirólisis

6.1.1. Caracterización del orujillo y de productos obtenidos de la pirólisis

En este apartado de la memoria se realizará la caracterización del producto de entrada (orujillo), así como de los principales productos obtenidos de la pirólisis.

ORUJILLO	
C	58.1%
H	2.1%
N	1.13%
O	38.67%
Cenizas	26%
Humedad	10%

Tabla 4 Análisis Elemental del orujillo

A partir de la composición de entrada del residuo mostrado en la Tabla 4, se han estimado los porcentajes de cada uno de los productos de salida de la pirólisis a diferentes temperaturas mediante las correlaciones obtenidas de Barry et al. (2019). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5 y en la Figura 9. El pirolizador seleccionado, trabaja de manera convencional con una velocidad de calentamiento lenta y un tiempo de residencia de 30 minutos. Se observa como a menores temperaturas, la carbonización es mayor y como resultado da una cantidad mayor de bio-char, en contra si se eleva la temperatura, la cantidad de char disminuye y la cantidad de syngas se eleva desde un 10% hasta un 22% de la composición total respecto al orujillo de entrada. La cantidad de bio-oil es muy alta duplicando las anteriores y teniendo un punto de máxima producción a los 500 grados.

RENDIMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS DEL ORUJILLO			
	400 °C	500 °C	600 °C
CHAR	36.72 %	29.11 %	26.87 %
BIOL-OIL	53.32 %	56.31 %	51.16 %
SYNGAS	9.96 %	14.58 %	21.96 %

Tabla 5 Descomposición de los productos de pirólisis por orujillo

Fuente: Elaboración propia con datos calculados a partir de (Barry et al., 2019)

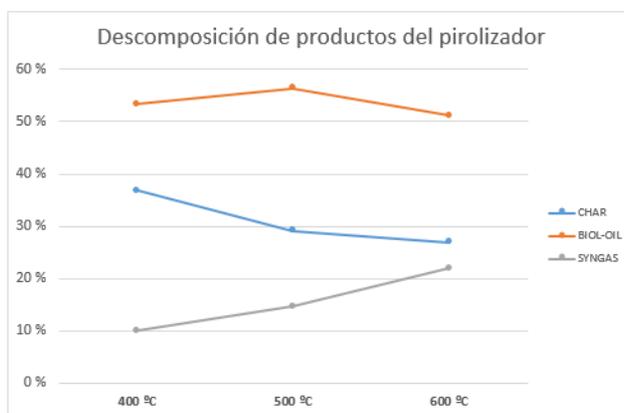


Figura 9 Descomposición de los productos de pirólisis por orujillo

Fuente: Elaboración propia con datos calculados a partir de (Barry et al., 2019)

En caso de querer como producto bio-char no solo se debería seleccionar una temperatura de 400°C sino también seleccionar una velocidad de calentamiento muy lenta y un tiempo de residencia de días para su mejor carbonización, en el caso del syngas la energía que este proporciona es de bajo nivel, por ello lo mejor sería cambiar la conversión termoquímica seleccionada por una gasificación que se centra ampliamente en este producto, y por último, para bio-oil seleccionar una temperatura de 500 grados con una velocidad de calentamiento rápida y un tiempo de residencia extremadamente rápido maximizará la producción de bioaceites.

Para el cálculo del poder calorífico inferior de los productos de salida de la pirólisis por orujillo se ha utilizado información procedente de Fernández et al. (2013) o Barry et al., (2019). Lo primero de todo es evaluar que cantidad de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno tiene cada producto. Dichas composiciones, se han obtenido a partir de las correlaciones propuestas por estos autores en función de la temperatura (mostradas en la Tabla 6 y 8 para el char, y syngas, respectivamente). Las composiciones del bio-oil, se han obtenido por diferencia. Los resultados obtenidos para cada de los productos de salida y cada una de las temperaturas, se muestran en las Tablas 7, 9 y 10 para el char, syngas y el bio-oil, respectivamente.

- Char (Fernández et al., 2013)

	$Y=ao*T^2+a1*T+a2$		
	ao	a1	a2
C	0.00009	-0.0925	65.6
H	-0.00001	-0.003	6
N	0.00007	-0.052	14.2
O	-0.00002	0.0216	-4.3
Cenizas	0.00004	0.0325	25.4

Tabla 6 Correlaciones de cálculo del char

	% másico		
	400	500	600
C	44.449	40.749	37.926
H	3.308	1.947	0.535
N	4.755	5.550	7.318
O	1.178	1.461	1.302
Cenizas	46.309	50.292	52.918

Tabla 7 Componentes másicas del char

- Syngas (Barry et al., 2019)

	$Y=ao*T^2+a1*T+a2$		
	ao	a1	a2
C	0.00009	-0.0925	65.6
H	-0.00001	-0.003	6
N	0.00007	-0.052	14.2
O	-0.00002	0.0216	-4.3
Cenizas	0.00004	0.0325	25.4

Tabla 8 Correlaciones de cálculo del syngas

	% másico		
	400	500	600
CO	25.506	44.717	58.439
CO ₂	66.847	33.132	3.993
H ₂	0.345	0.552	2.166
CH ₄	6.703	15.334	25.516
Otros	0.598	6.265	9.886

Tabla 9 Componentes másicas del syngas

- Bio-oil. Se determinan por diferencia, es decir, como lo que entra de cada elemento menos lo que sale con el char y con el syngas.

	% másico		
	400	500	600
C	38.325	39.718	36.230
H	0.672	0.711	0
N	0	0	0
O	52.007	48.210	51.988
Cenizas	8.995	11.360	11.780

Tabla 10 Componentes másicas del bio-oil

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, a partir de la composición elemental del char y el bio-oil, se han obtenido los PCI de cada uno de ellos a partir de la fórmula propuesta por Dulong, y los resultados se muestran en la Tabla 11. Para el char se observa claramente como a medida que aumenta la temperatura del tratamiento, disminuye el PCI del mismo, y esto se debe a que el contenido en carbono va disminuyendo (ya que pasa a una de las otras fracciones obtenidas: bio-oil o syngas). Sin embargo, el PCI del bio-oil es máximo para una temperatura de 500°C.

PCI (kJ/kg)	CHAR	19587.933	16378.355	13491.612	BIO-OIL	4656.7449	5855.125	2999.950
T(°C)		400	500	600		400	500	600

Tabla 11 Cálculo del PCI del biochar y el bio-oil obtenido a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración propia

Para el syngas, se ha considerado que está compuesto por CO₂, CO, H₂ y CH₄ (Tabla 9), y se ha obtenido el valor del PCI teniendo en cuenta los poderes caloríficos de cada uno de estos compuestos. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla X.

PCI (kJ/kg)	SYNGAS	6.564	15.041	24.737
T(°C)		400	500	600

Tabla 12 Cálculo del PCI del syngas obtenido a diferentes temperaturas

Fuente: Elaboración propia

El poder calorífico inferior se tomará posteriormente como valor para el cálculo de precio de venta de char y bio-oil y para saber la energía que entra en la combustión del syngas. Ya que como ambos van a ser utilizados como combustible, el precio será mayor a medida que tenga un mayor PCI.

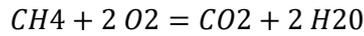
6.1.2. Combustión del gas natural

El gas natural se ha utilizado como combustible para aportar la energía suficiente para el proceso de pirólisis. Se ha partido de la composición de gas natural mostrada en la Tabla 13.

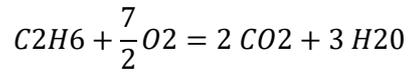
Gas natural	
CH ₄	90.87%
C ₂ H ₆	6.19%
CO	1.88%
N ₂ y C ₃ H ₆	1.06%

Tabla 13 Composición del gas natural

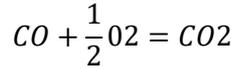
A partir de estos datos, se ha determinado la composición de los gases de combustión obtenidos (CO₂ y H₂O) teniendo en cuenta las reacciones de combustión completa de cada uno de los compuestos que forman el gas natural de partida. De la misma manera, se ha determinado la cantidad de aire necesario para dicha combustión.



Reacción 1



Reacción 2



Reacción 3

Los resultados obtenidos se muestran posteriormente en la Tabla 15.

6.1.3. Balances en el pirolizador

Para evaluar la cantidad de gas natural que utiliza el pirolizador es necesaria la realización de un balance de materia y de energía en el pirolizador. Una vez obtenida la cantidad y composición de gas natural se han podido calcular la cantidad de gases de escape que salen del pirolizador. Estos gases de combustión serán tratados como un subproducto y se reutilizará su energía de escape mediante intercambiadores de calor para precalentar las entradas del pirolizador, optimizando energéticamente el proceso y ahorrando una cantidad de gas natural.

Las ecuaciones utilizadas para balance en el pirolizador sabiendo que tenemos 2 incógnitas, $m_{gas\ natural}$ (masa de gas natural) y Q_2 (energía que necesito aportar) son:

$$1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5$$

$$Q_{in} + Q_2 = Q_{out} + Q_{pirólisis} + Q_{per}$$

Ecuación 1

- 1- Q_{in} : es la energía que entra al pirolizador con la corriente de entrada (orujillo):

$$Q_{in} = m_{orujillo} * C_{p_{orujillo}} * (\Delta T)$$

Ecuación 2

- 2- Q_2 : es la energía que hay que aportar para la pirólisis, que a su vez se obtiene mediante la combustión del gas natural:

$$I \quad II \quad III \quad 2$$

$$Q_{gn} + Q_{aire} = Q_{gc} + Q_2$$

Ecuación 3

I

$$Q_{gn} = m_{gas\ natural} * C_{p_{gas\ natural}} * (\Delta T) + m_{gas\ natural} * PCI$$

Ecuación 4

II

$$Q_{aire} = m_{aire} * C_{p_{aire}} * (\Delta T)$$

Ecuación 5

$$m_{aire} = m_{gas\ natural} * X_{O_2} * \left(\frac{1}{0,233}\right)$$

Ecuación 6

III

$$Q_{gc} = m_{co2} * Cp_{co2} * (\Delta T) + m_{h2o (gc)} * Cp_{h2o (gc)} * (\Delta T) + m_{n2} * Cp_{n2} * (\Delta T)$$

Ecuación 7

$$m_{co2} = m_{gas\ natural} * X_{co2}$$

Ecuación 8

$$m_{h2o (gc)} = m_{gas\ natural} * X_{h2o}$$

Ecuación 9

$$m_{n2 (inerte)} = m_{aire} (1 - 0.233)$$

Ecuación 10

3- Qout: es la energía que sale del proceso a través de los productos de salida

$$Q_{out} = m_{char} * Cp_{char} * (\Delta T) + m_{syngas} * Cp_{syngas} * (\Delta T) + m_{bio-oil} * Cp_{bio-oil} * (\Delta T)$$

Ecuación 11

4- Qpirólisis: es la energía consumida en el propio proceso de pirólisis, que dependerá de la temperatura a la que se lleve a cabo (400, 500 o 600°C)

$$Q_{pirólisis} = m_{orujillo} * Cp_{orujillo} * (T_{400-500-600°C} - T_{in}) + m_{h2o} * Cp_{h2o} * (T_{100°C} - T_{ref}) + m_{h2o} * Q_l + m_{h2o} * Cp_{h2o} * (T_{400-500-600°C} - T_{100°C}) + \text{Energía de pirólisis consumida}$$

Ecuación 12

$$m_{h2o} = m_{orujillo} * \text{Humedad \%}$$

Ecuación 13

5- Qperd: es la energía que se pierde en el proceso. Se han supuesto que las pérdidas representan el 5% de la energía de entrada (Qin + Q2)

$$Q_{per} = 0.05 * (Q_{in} + Q_2)$$

Ecuación 14

Los datos utilizados estarán escritos en el apartado de ANEXOS

A partir de las ecuaciones anteriores, se determina la cantidad de gas natural necesaria para la pirólisis del orujillo a cada una de las temperaturas estudiadas y cada uno de los caudales de entrada. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

	t de orujillo de entrada (t/h)	400°C	500°C	600°C
Producción gas natural (t/h)	20	8.384	11.355	13.181
	48	20.121	27.253	31.634
	70	29.343	39.744	46.133

Tabla 14 Cantidad de gas natural

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se calculará la misma masa para una alternativa de ahorro en el sistema mediante el precalentamiento con los gases de escape, esto disminuirá dicha cantidad y se podrá comprobar un porcentaje de ahorro dado.

Como resumen, en la Figura 10 se muestra el esquema del proceso de pirólisis para uno de los casos estudiados (el resto de los casos estudiados se encuentran en el ANEXO). Hay que tener en cuenta, que los datos de salida dependen del caudal de orujillo de entrada y de la temperatura de pirólisis. Los casos en los que tenemos distinto caudal de entrada (20, 48 y 70 t/h) y misma temperatura, solo cambiarán los caudales de salida del proceso, manteniendo las mismas composiciones. Sin embargo, al cambiar la temperatura, también cambian las composiciones de cada una de las corrientes de salida.

Todos los datos se recogen en la Tabla 15.

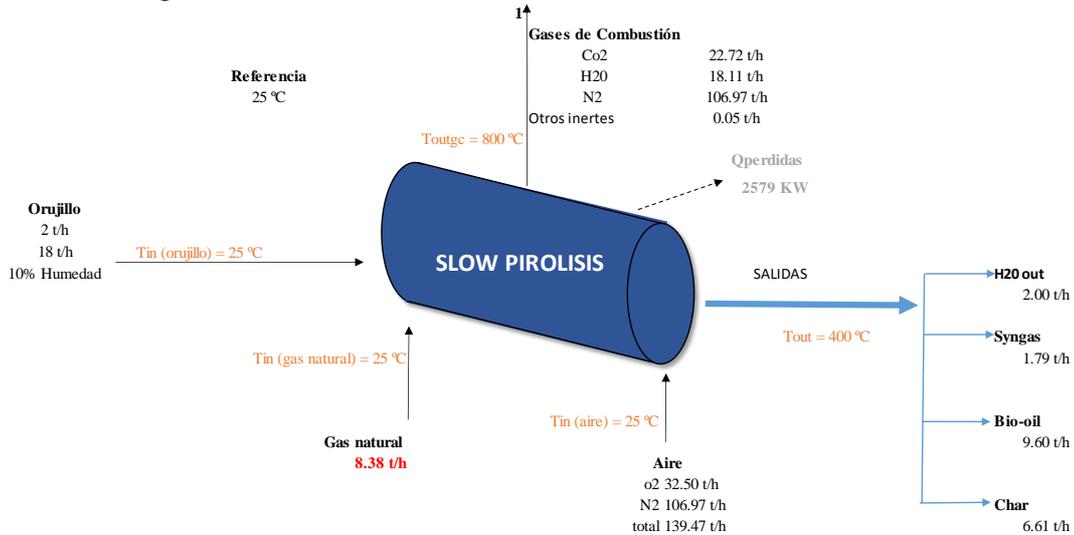


Figura 10 Caso base proceso de pirólisis 20 toneladas orujillo 400°C

Fuente: Elaboración propia

Orujillo (t/h)	Temperatura (°C)	Gas natural (t/h)	Aire (t/h)	Gases combustión		Char		Syngas		Bio-oil	
				(t/h)	(t/h)	(t/h)	PCI (kJ/kg)	(t/h)	PCI (kJ/kg)	(t/h)	PCI (kJ/kg)
20	400	8.384	139.466	CO2	22.720	6.610	19587.933	1.793	6564.422	9.598	4656.745
				H2O	18.109						
				N2	106.970						
20	500	11.355	188.900	CO2	30.773	5.240	16378.356	2.624	15041.756	10.136	5855.125
				H2O	24.528						
				N2	144.886						
20	600	13.181	219.265	CO2	35.720	4.837	13491.612	3.955	24736.885	9.209	2999.950
				H2O	28.471						
				N2	168.177						
48	400	20.121	334.718	CO2	54.528	15.863	19587.933	4.303	6564.422	23.034	4656.745
				H2O	43.461						
				N2	256.728						
48	500	27.253	453.360	CO2	73.856	12.576	16378.356	6.299	15041.756	24.326	5855.125
				H2O	58.867						
				N2	347.727						
48	600	31.634	526.237	CO2	85.728	11.608	13491.612	9.491	24736.885	22.101	2999.950
				H2O	68.329						
				N2	403.624						
70	400	29.343	488.130	CO2	79.520	23.134	19587.933	6.275	6564.422	33.592	4656.745
				H2O	63.381						
				N2	374.396						
70	500	39.744	661.149	CO2	107.706	18.339	16378.356	9.185	15041.756	35.475	5855.125
				H2O	85.847						
				N2	507.102						
70	600	46.133	767.429	CO2	125.020	16.928	13491.612	13.841	24736.885	32.231	2999.950
				H2O	99.647						
				N2	588.618						

Tabla 15 Resumen de los procesos de la pirólisis

Fuente: Elaboración propia

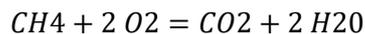
6.2. Combustión del syngas en la caldera

La caldera es el segundo elemento principal de la planta después del pirolizador. La caldera escogida es de estilo acuotubular, es decir, que el agua circula por el interior de los tubos y los gases lo hacen por el exterior en sentido perpendicular a la circulación de agua facilitando una mayor transferencia de calor. Las calderas acuotubulares son idóneas para la producción de vapor sobrecalentado a altas presiones como es en este caso. La idea principal es aprovechar el syngas residual del pirolizador para combustionarlo en la caldera para calentar el agua de red y producir vapor sobrecalentado que genere energía eléctrica mediante una turbina y su correspondiente generador. Así el proceso estaría completo y se aprovecharía al máximo este producto de la pirólisis.

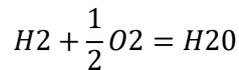
La caldera estará diseñada para generar vapor sobrecalentado a 40 bara y 315°C y tendrá un rendimiento del 85%.

6.2.1. Combustión del syngas

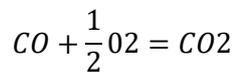
La composición del syngas se calculó mediante (Barry *et al.*, 2019) como se ve en la Tabla 9. A partir de ahí se ha realizado el cálculo la cantidad de gases de escape de la caldera y la cantidad de vapor sobrecalentado.



Reacción 4



Reacción 5



Reacción 6

Los resultados obtenidos se muestran posteriormente en la Tabla 17.

6.2.2. Balances en la caldera

Ecuaciones utilizadas para balance en la caldera.

$$Q_{agua\ de\ red} + Q_2 = Q_{vapor} + Q_{purga} + Q_{per}$$

Ecuación 15

$$Q_{syngas} + Q_{aire} = Q_{calentar\ aire} + Q_{gc} + Q_2$$

Ecuación 16

1

$$Q_{agua\ de\ red} = m_{agua\ de\ red} * h_{agua\ de\ red}$$

Ecuación 17

2

Calor que necesito aportar

I

$$Q_{syngas} = m_{syngas} * PCI_{400^{\circ}C-500^{\circ}C-600^{\circ}C}$$

Ecuación 18

II

$$Q_{aire} = m_{aire} * Cp_{aire} * (\Delta T)$$

Ecuación 19

$$m_{aire} = m_{syngas} * X_{O_2} (400^{\circ}C-500^{\circ}C-600^{\circ}C) * \left(\frac{1}{0,233}\right)$$

Ecuación 20

III

$$Q_{calentar\ aire} = m_{aire} * Cp_{aire} * (T_{400-500-600^{\circ}C} - T_{pre-calentado})$$

Ecuación 21

IV

$$Q_{gc} = m_{CO_2} * Cp_{CO_2} * (\Delta T) + m_{H_2O(g)} * Cp_{H_2O(g)} * (\Delta T) + m_{N_2} * Cp_{N_2} * (\Delta T)$$

Ecuación 22

$$m_{CO_2} = m_{syngas} * X_{CO_2}$$

Ecuación 23

$$m_{H_2O(g)} = m_{syngas} * X_{H_2O}$$

Ecuación 24

$$m_{N_2} (inerte) = m_{aire} (1 - 0.233)$$

Ecuación 25

3

$$Q_{vapor} = m_{vapor} * h_{vapor}$$

Ecuación 26

$$m_{agua\ de\ red} = m_{vapor} + m_{purga}$$

Ecuación 27

4

$$Q_{purga} = m_{purga} * h_{purga}$$

Ecuación 28

$$m_{purga} = m_{vapor} * 0.02$$

Ecuación 29

5

$$Q_{per} = 0.15 * (Q_{agua\ de\ red} + Q_2)$$

Ecuación 30

Los datos utilizados estarán escritos en el apartado de ANEXOS

Con este proceso se calcula la masa de vapor sobrecalentado que sale de la caldera en de cada uno de los casos estudiados mostrado en la Tabla 16:

	t de orujillo a la entrada (t/h)	400°C	500°C	600°C
t de vapor salida de la caldera (t/h)	20	1.786	6.540	13.531
	48	4.286	15.697	32.475
	70	6.251	22.891	47.360

Tabla 16 Cantidad de vapor sobrecalentado

Fuente: Elaboración propia

Como resumen, en la Figura 11 se muestra el esquema de la caldera para uno de los casos estudiados (el resto de los casos estudiados se muestran en el ANEXO).

Todos los datos se recogen en la Tabla 17.

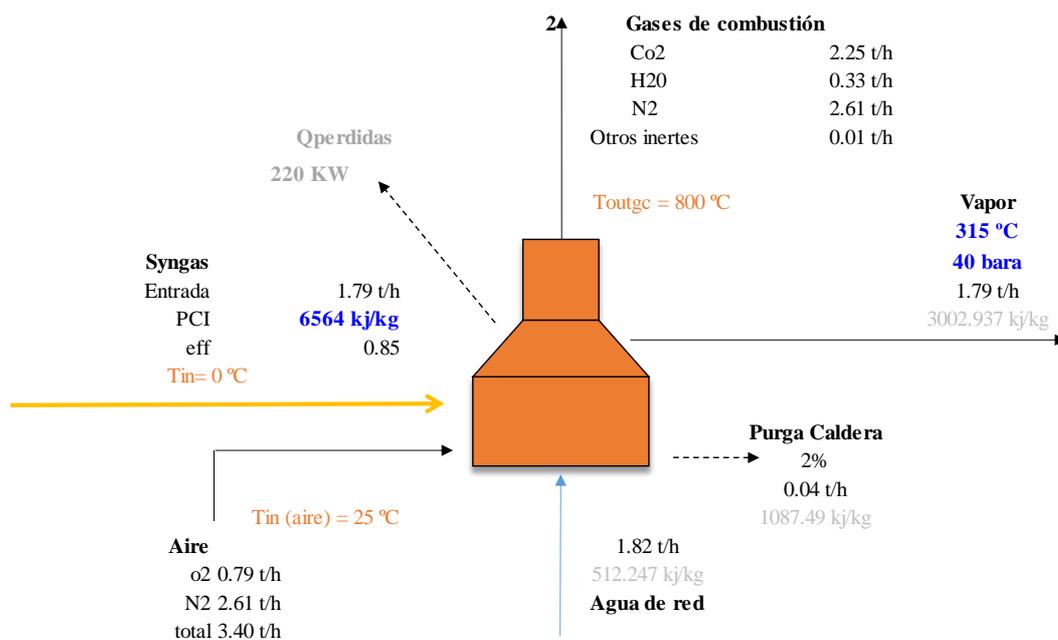


Figura 11 Caso base proceso de pirólisis 20 toneladas orujillo 400°C

Orujillo (t/h)	Temperatura (°C)	Syngas (t/h)	Aire (t/h)	Gases combustión		Vapor sobrecalentado (t/h)
					(t/h)	
20	400	1.79	3.40	CO2	2.25	1.79
				H2O	0.33	
				N2	2.61	
20	500	2.62	10.28	CO2	3.82	6.54
				H2O	1.04	
				N2	7.89	
20	600	3.95	25.93	CO2	6.56	13.53
				H2O	3.04	
				N2	19.89	
48	400	4.30	8.15	CO2	5.39	4.29
				H2O	0.78	
				N2	6.25	
48	500	6.30	24.68	CO2	9.17	15.70
				H2O	2.49	
				N2	18.93	
48	600	9.49	62.24	CO2	15.75	32.48
				H2O	7.30	
				N2	47.74	
70	400	6.28	11.89	CO2	7.87	6.25
				H2O	1.14	
				N2	9.12	
70	500	9.19	36.00	CO2	13.37	22.89
				H2O	3.63	
				N2	27.61	
70	600	13.84	90.76	CO2	22.98	47.36
				H2O	10.65	
				N2	69.62	

Tabla 17 Resumen de los procesos de la pirólisis

Fuente: Elaboración propia

Se observa como a medida que aumenta la temperatura del proceso, aumenta la cantidad de syngas, y por tanto la cantidad de vapor recalentado obtenido. Sin embargo, no hay que olvidar, que el principal objetivo del proceso es obtener un biochar de calidad para la venta, por lo que se pretenderá favorecer la formación de dicho producto.

7. ESTUDIO DEL PROCESO COMPLETO Y ESTUDIO DE POSIBLES MEJORAS ENERGÉTICAS

7.1. Estudio y diagramas de procesos de los casos base.

Una vez que se ha estudiado en detalle los procesos que tienen lugar en la pirólisis y en la caldera, se propone la realización del diagrama del proceso completo, lo más detallado posible, para poder evaluar económicamente cada uno de los casos de mejora propuestos. El vapor sobrecalentado generado en la caldera será reconducido por un sistema de colectores en alta y baja presión, como interconector de estos colectores se pondrá una turbina y un generador que genere energía eléctrica.

El vapor saliente de la turbina llegará a un colector de baja donde habrá dos ramificaciones, las cuales son una salida para el desgasificador, que aprovechará parte de la energía del vapor y otra salida para un proceso denominado Users&Procesos. Este proceso se nombrado así ya que el vapor que entra es vapor aprovechable para usuario (clientes) o para procesos de la propia industria, en caso de unificar parte de la almazara, extractora y la central de biomasa este vapor podría precalentar procesos que favorezcan el funcionamiento de la misma producción del aceite de oliva. Este “vapor aprovechable” es el mínimo valor para que no haya venteo en el colector de baja. Se ha supuesto que el vapor que llega a los Users&Procesos vuelve como condensado, aun siendo el sistema de la central de biomasa simple, se ha intentado recuperar y aprovechar toda la energía posible en la central de biomasa por ello, se recuperará parte de la energía del condensado mediante una serie de purgadores, entonces el fluido recuperable se direcciona al tanque de condensados donde se aprovechará el venteo para entrar en el colector de baja y el líquido saturado para disminuir la cantidad de agua procedente de la red que se compre.

Todo este proceso está muy simplificado y su único propósito es evaluar la electricidad que se puede generar gracias al vapor procedente de la caldera para evaluar sus costes y beneficios posteriormente.

En el apartado de ANEXOS se muestran los 9 casos de diagramas de procesos para cada uno de los casos estudiados (una entrada de 20t/h, 48t/h y 70t/h toneladas hora de orujillo con temperaturas del proceso de pirólisis de 400°C, 500°C y 600°C).

En las Tablas 18, 19 y 20 se puede observar un resumen de los datos más importantes obtenidos para cada uno de los casos estudiados. En ellas se muestra el vapor sobrecalentado a la salida de la caldera, la energía eléctrica que es capaz de generarse a través de la turbina, la cantidad de gas natural a la entrada del pirolizador y el valor de los Users&Procesos que es el vapor aprovechable que existe todavía en el proceso.

	CASO BASE			VAPOR APROVECHABLE
	t vapor out caldera	KW turbinados	t gas natural	Users baja (3 bara)
400	20 t/h	1.786 t/h	165 KW	8.384 t/h
	48 t/h	4.286 t/h	427 KW	20.121 t/h
	70 t/h	6.251 t/h	633 KW	29.343 t/h
				1.382 t/h
				3.543 t/h
				5.241 t/h

Tabla 18 Datos más relevantes caso base 400°C

	CASO BASE			APROVECHABLES
	t vapor out caldera	KW turbinados	t gas natural	Users baja
500	20 t/h	6.540 t/h	664 KW	11.355 t/h
	48 t/h	15.697 t/h	1624 KW	27.253 t/h
	70 t/h	22.891 t/h	2379 KW	39.744 t/h
				5.491 t/h
				13.403 t/h
				19.621 t/h

Tabla 19 Datos más relevantes caso base 500°C

	CASO BASE				APROVECHABLES
		t vapor out caldera	KW turbinados	t gas natural	Users baja
	600	20 t/h	13.531 t/h	1397 KW	13.181 t/h
	48 t/h	32.475 t/h	3384 KW	31.634 t/h	27.904 t/h
	70 t/h	47.360 t/h	4945 KW	46.133 t/h	40.767 t/h

Tabla 20 Datos más relevantes caso base 600°C

Fuente: Elaboración propia

7.2. Suposiciones

Se debe hacer una serie de suposiciones para simplificar los procesos, poder estudiar alternativas concretas y debido a la falta de datos en algunos procesos.

1. Tres temperaturas constantes en la pirólisis. 400°C, 500°C y 600°C.
2. El vapor sobrecalentado de salida de la caldera tiene unas propiedades de presión y temperatura de 40 bara y 315°C.
3. Durante todo el proceso tomamos el valor de las presiones como una constante de confianza más que las temperaturas.
4. El orujillo como bien se ha estudiado durante el proceso de producción contemplará una humedad del 10%.
5. La pirólisis tendrá unas pérdidas del 5% de productos de entrada
6. La caldera tendrá una eficiencia del 85%.
7. Se añadirá al sistema de vapor perdidas por calor de 35kW y unas fugas de vapor del 1%.
8. El valor de los Users&Procesos será el valor que se necesite para cualquier proceso adicional, este se devolverá totalmente en condensado favoreciendo al desarrollo de la industria de biomasa completa, mediante unos purgadores intentaremos recuperar el máximo de vapor posible con un 50% de eficiencia.

7.3. Estudio y diagramas de procesos en los casos con precalentamiento con intercambiadores.

Como alternativa se propone la realización del mismo proceso, pero en el que haya un precalentamiento de 5 de las entradas con los gases de combustión de la pirólisis y la caldera. Las entradas son (i) el orujillo que entra, (ii) el aire que entra en el pirolizador, (iii) el gas natural, (iv) el aire que entra en la caldera y (v) el agua de red. Se han puesto intercambiadores de calor de salida de gases de escape con un rendimiento de transferencia del 40%. Además, se optimizará el proceso de colectores con 2 intercambiadores más que precalientan también el agua de red, aprovechando la energía que sale de la purga y la energía que sale del venteo del tanque de condensados. Estos intercambiadores de calor tendrán un rendimiento del 70%.

Precalentar la fuente de orujillo de entrada al pirolizador es una alternativa no recomendable desde un punto de vista técnico, ya que por las características del mismo (principalmente su viscosidad), muestra muchos inconvenientes y posibles problemas (condensación, atascamiento, ensuciamiento, etc.). Por ello se propone como alternativa a investigar, pero no podrá superar una temperatura de precalentamiento de 100°C.

En el apartado de ANEXOS se muestran los 9 casos de precalentamiento con intercambiadores para una entrada de 20t/h, 48t/h y 70t/h toneladas hora de orujillo con temperaturas a 400°C, 500°C y 600°C.

A continuación, se muestran en las Tablas 21 y 22 la cantidad de gas natural que hace falta a la entrada de los pirolizadores de cada uno de los casos de precalentamiento con intercambiadores, se dividirán en (i) con precalentamiento de orujillo y (ii) sin precalentamiento de orujillo. En estos resultados se puede apreciar que la cantidad de gas natural disminuye, ahorrando recursos para el mismo proceso. En el caso de precalentar el

orujillo esta cantidad es inferior que, al no precalentarlo, demostrando que sería muy interesante investigar la alternativa a pesar de que a hoy en día no sea una realidad óptima.

	CASO PRECALENTAMIENTO CON PRE-ORUJILLO		
	t gas natural	t gas natural	t gas natural
20 t/h	5.832 t/h	8.095 t/h	9.465 t/h
48 t/h	13.998 t/h	19.346 t/h	22.740 t/h
70 t/h	20.419 t/h	28.284 t/h	33.112 t/h

Tabla 21 Cantidad de gas natural con precalentamiento

Fuente: Elaboración propia

	CASO PRECALENTAMIENTO SIN PRE ORUJILLO		
	t gas natural	t gas natural	t gas natural
20 t/h	6.531 t/h	8.689 t/h	10.092 t/h
48 t/h	15.342 t/h	20.848 t/h	23.961 t/h
70 t/h	22.386 t/h	30.186 t/h	35.014 t/h

Tabla 22 Cantidad de gas natural con precalentamiento sin pre-orujillo

Fuente: Elaboración propia

7.4. Evaluación del ahorro económico del proceso de valoración del orujillo

El ahorro energético es algo diferente al ahorro económico. No siempre un ahorro económico supone un ahorro energético. Es importante tener clara la diferencia cuando se habla de ahorro, ya que se necesita saber con qué referencia se está trabajando. Una vez resueltas las alternativas de valorización propuesta se han comparado las equivalencias económicas de los costes y ventas de cada una de las entradas y salidas del proyecto para comprobar el ahorro económico. Esto será el comienzo para la elección de la mejor alternativa energética dentro de la mejora energética del proceso de valorización de orujillo mediante pirólisis.

En relación con los costes se ha tenido en cuenta: (i) Coste eléctrico de la energía importada para llegar a la potencia contratada (mínimo de 2MW), (ii) coste del gas natural que entra en el pirolizador y (iii) coste del agua de red que se necesita para la caldera.

En relación con las ventas se ha tenido en cuenta: (i) la energía eléctrica generada y vendida, (ii) la venta del char y (iii) la venta de bio-oil.

Como resultado se obtendrán un valor de ahorro en los costes y otro valor con una proyección de ventas.

Los precios unitarios utilizados se muestran en las siguientes Tabla 23 y Tabla 24 y son una estimación de los precios originales sacados de las correspondientes fuentes de información que se muestran en la misma tabla. El precio unitario dependerá de la calidad del producto. Hay que tener en cuenta que el precio unitario de venta del char y bio-oil variará, ya que a mayor temperatura en el proceso de pirólisis el char pierde calidad y su poder calorífico inferior disminuye haciendo que el precio unitario de venta de este también disminuya. Esta categorización de precios por temperatura se ve en la Tabla 24

Precio unitario de los costes		
Generación eléctrica (en caso de que sea necesaria una importación)	0,20 €/kWh	Selectra 2021
Gas natural	250,00 €/t	Selectra 2021
Agua de red	1,5€/t	AEAS 2020

Tabla 23 Precio unitario de los costes

Fuente: Elaboración propia

Precio unitario de las ventas				
//////////	400	500	600	
Char	50,0€/t	41,8€/t	34,4€/t	Vermichar 2021
Bio-oil	17,0€/t	21,4€/t	11,0€/t	Vermichar 2021

Tabla 24 Precio unitario de las ventas

Fuente: Elaboración propia

Para el precio unitario de venta de la energía eléctrica generada se ha supuesto la mitad del valor de coste, es decir, 0,10 €/kWh

Con los precios unitarios y los valores de las cantidades de cada una de las corrientes energéticas que se han valorado, se calculan los ahorros económicos en el propio diagrama de procesos.

En la Tabla 25 se puede ver como se ha calculado ahorro de costes y las proyecciones de ventas para un caso particular (20 toneladas de entrada de orujillo y 400°C de temperatura en pirólisis). El ahorro de costes que se muestra como resultado en la Tabla 25 es 0k€/año, esto es debido a que no se ha tomado una referencia para ese ejemplo, con la proyección de ventas ocurre igual.

Para determinar la temperatura óptima a la que hay que realizar el proceso de valorización de orujillo mediante pirólisis se ha utilizado como referencia los costes y ventas totales de operación de los casos bases a una temperatura de pirólisis a 400°C, es decir, en caso de que el ahorro de costes y la proyección de ventas sean negativos, no merecerá la pena dicha situación ya que empeoraría respecto a la de 400°C.

Como se observa en las Tablas 26 y 27 se perderá dinero y recursos al elevar la temperatura de 400°C a 500°C o 600°C en el proceso. Esto demuestra que la mejor alternativa en una pirólisis que trabaja de manera convencional con una velocidad de calentamiento lenta es de 400°C. Esto se debe, a que el principal objetivo de la pirólisis lenta es la obtención de un biochar lo más energético posible. Por tanto, el proceso de pirólisis a 400°C, es el que maximiza la producción de char, y el PCI del mismo, y con ello, maximiza el beneficio de su posterior venta. Por tanto, el syngas se considerará un subproducto a aprovechar, pero que, al no ser el producto principal, no merecerá la pena maximizarlo en este caso ya que cuanto mayor syngas haya menor producción de char habrá y a menor calidad.

Ejemplo cálculo del ahorro en cada una de las alternativas de los procesos estudiados

<u>Costes</u>			
Generación eléctrica			
Generation	165 kW		3600 hrs
Demand	2000 kW	16.5 €/h	
Import	1835 kW		Coste
Unit Cost	0.20 €/kWh	366.9 €/h	1320.9 k€/año
Gas natural			
Pirólisis	8.4 t/h		Coste
Unit Cost	250.00 €/t	2095.9 €/h	7545.4 k€/año
Agua de red			
Flow	0.90 t/h		Coste
Unit Cost	1.5€/t	1.4 €/h	4.9 k€/año
<u>Ventas</u>			
Char			
Cantidad	6.610 t/h		venta
Unit Sell	50.0€/t	330.5 €/h	1189.7 k€/año
Bio-oil			
Cantidad	9.598 t/h		venta
Unit Sell	17.0€/t	163.2 €/h	587.4 k€/año
Generación eléctrica			
Cantidad	165 kW		venta
Unit Sell	0.10 €/kWh	16.5 €/h	59.5 k€/año
Coste total de operación			8871.17 k€/año
Venta total de operación			1836.65 k€/año
COSTES (referencias)			8871.17 k€/año
		Ahorro en los costes	0.00 k€/año
VENTAS (referencias)			1836.65 k€/año
		Proyección de ventas	0.00 k€/año

Tabla 25 Ahorro de costes y proyección de ventas

Fuente: Elaboración propia

		Ahorro de costes a 500°C	Proyección de ventas
500	20 t/h	-2328.67 k€/año	-29.21 k€/año
	48 t/h	-5587.94 k€/año	-69.67 k€/año
	70 t/h	-8508.93 k€/año	-101.53 k€/año

Tabla 26 Ahorro de costes y proyecciones de ventas para 500°C respecto a 400°C como referencia

Fuente: Elaboración propia

		Ahorro de costes a 600°C	Proyección de ventas
600	20 t/h	-3462.45 k€/año	-371.11 k€/año
	48 t/h	-9388.81 k€/año	-890.14 k€/año
	70 t/h	-14276.84 k€/año	-1298.03 k€/año

Tabla 27 Ahorro de costes y proyecciones de ventas para 600°C respecto a 400°C como referencia

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se mostrará el ahorro económico que se produce al proponer como alternativa el precalentamiento de las fuentes de entrada del proceso mediante intercambiadores. Los casos de precalentamiento con intercambiadores se explican en el Apartado 7.1.3.

En este caso se tomará como referencia los costes y ventas de operación de los casos bases para el cálculo de los ahorros de costes y proyección de ventas de los casos con intercambiadores, es decir, para el caso de precalentamiento de 20 toneladas a 400°C se cogerá su respectivo caso base, así se podrá contemplar su mejora real.

Los resultados están expuestos en las Tablas 28, 29 y 30, el sistema de intercambiadores genera un claro beneficio. Este será mayor en el caso de precalentar el orujillo también. El punto clave del ahorro de costes es el gas natural de entrada en la pirólisis, como se puede observar en las Tablas 21 y 22, el gas natural disminuirá al precalentar las entradas del proceso haciendo que en el ahorro de costes se muestre un beneficio como resultado. Las ventas son mejores debido a que se generará mayor energía eléctrica al obtener mayor cantidad de vapor sobrecalentado a la salida de la caldera. Las fuentes de char y bio-oil no cambian nada, ya que la temperatura es del proceso de pirólisis se mantiene constante en relación con su referencia y su composición de salida no cambiará.

		Ahorro con orujillo precalentamiento	Ahorro sin orujillo precalentamiento	Ambos casos
		Ahorro de costes	Ahorro de costes	Proyección de ventas
400	20 t/h	2327.01 k€/año	1698.42 k€/año	16.06 k€/año
	48 t/h	5586.96 k€/año	4377.16 k€/año	39.73 k€/año
	70 t/h	8141.95 k€/año	6372.02 k€/año	57.74 k€/año

Tabla 28 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 400°C

Fuente: Elaboración propia

		Ahorro con orujillo precalentamiento	Ahorro sin orujillo precalentamiento	Ambos casos
		Ahorro de costes	Ahorro de costes	Proyección de ventas
500	20 t/h	2986.34 k€/año	2451.39 k€/año	27.45 k€/año
	48 t/h	7252.76 k€/año	5900.74 k€/año	71.83 k€/año
	70 t/h	10159.86 k€/año	8448.45 k€/año	108.20 k€/año

Tabla 29 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 500°C

Fuente: Elaboración propia

		Ahorro con orujillo precalentamiento	Ahorro sin orujillo precalentamiento	Ambos casos
		Ahorro de costes	Ahorro de costes	Proyección de ventas
600	20 t/h	3434.95 k€/año	2870.73 k€/año	48.00 k€/año
	48 t/h	7874.39 k€/año	6775.78 k€/año	121.15 k€/año
	70 t/h	11706.64 k€/año	9995.23 k€/año	182.83 k€/año

Tabla 30 Ahorro de costes y proyecciones de ventas casos precalentamiento a 600°C

Fuente: Elaboración propia

Existen diversos caminos alternativos que se podrían haber tomado a lo largo de la valorización de orujillo mediante la pirólisis. Entre ellos, usar el char como combustible de un caldera o horno es una aplicación que podría haberse tenido en cuenta, ya que a 400°C el poder calorífico del char es bastante alto y con una buena cantidad se podría generar mucha energía. Generando mucho vapor sobrecalentado y con ello, mucha más energía eléctrica, que a lo mejor a la larga dará una mayor rentabilidad. Cambiar el tipo de pirolizador hubiese cambiado a la hora de enfocar el estudio, en el caso expuesto la rentabilidad de la pirólisis lenta es aparente, pero que hubiese pasado si se priorizase una pirólisis rápida o ultrarrápida (flash) que maximizase la cantidad de syngas.

8. CONCLUSIONES

A lo largo del TFG se ha observado como el orujillo es un residuo que puede ser valorizado energéticamente mediante un proceso de pirólisis tal y como el estudiado en el TFG. Por tanto, supone una mejora del proceso de producción del aceite de oliva, en línea con la economía circular, lo cual permite mejorar el sector oleico actual. Se ha observado como los principales productos obtenidos de la pirólisis son un char (fracción sólida), un bio-oil (fracción líquida) y un syngas (fracción gaseosa), y que la cantidad obtenida de cada uno de ellos depende de la temperatura a la que se realice la pirólisis. Además, no solo cambia la cantidad obtenida, si no también, la composición de cada uno de los productos. Por tanto, las condiciones de operación deberán elegirse en función del objetivo principal del proceso. En este caso, tras realizar un estudio de casos, teniendo en cuenta el beneficio económico de cada uno de los productos obtenidos, se ha determinado que la opción más favorable es la realización del proceso a 400°C, ya que bajo estas condiciones se maximiza la cantidad de biochar obtenida y el PCI del mismo. El resto de los productos, aunque no sean el producto principal, se podrán aprovechar para la mejora tanto energética como económica del proceso.

Finalmente, teniendo en cuenta las altas temperaturas a las que se trabaja en el proceso, y con el objetivo de proponer alternativas que mejoren energéticamente el proceso inicial, se han propuesto varios casos en los que se aprovecha la energía de las corrientes de salida mediante intercambiadores de calor que permitan precalentar diferentes corrientes de entrada. Estudiando el ahorro de costes y las proyecciones de ventas para cada uno de los casos.

9.1. Datos utilizados para los cálculos aportados

Datos utilizados para el balance de energía	
QL (cambio de fase)	2260 kJ/kg
Cp agua	4.184 kJ/kg*k
Cp vapor	2.066 kJ/kg*k
Cp vapor a 800	2.270 kJ/kg*k
Cp Co2	1.112 kJ/kg*k
Cp orujillo	4.091 kJ/kg*k
Cp aire	1.069 kJ/kg*k
Cp gas natural	3.328 kJ/kg*k
PCI gas natural	39900 kJ/kg
Cp syngas	3.191 kJ/kg*k
Cp Bio-oil	1.700 kJ/kg*k
Cp char	2.440 kJ/kg*k
Cp n2	1.175 kJ/kg*k

Tabla 31 Datos utilizados para el balance de energía

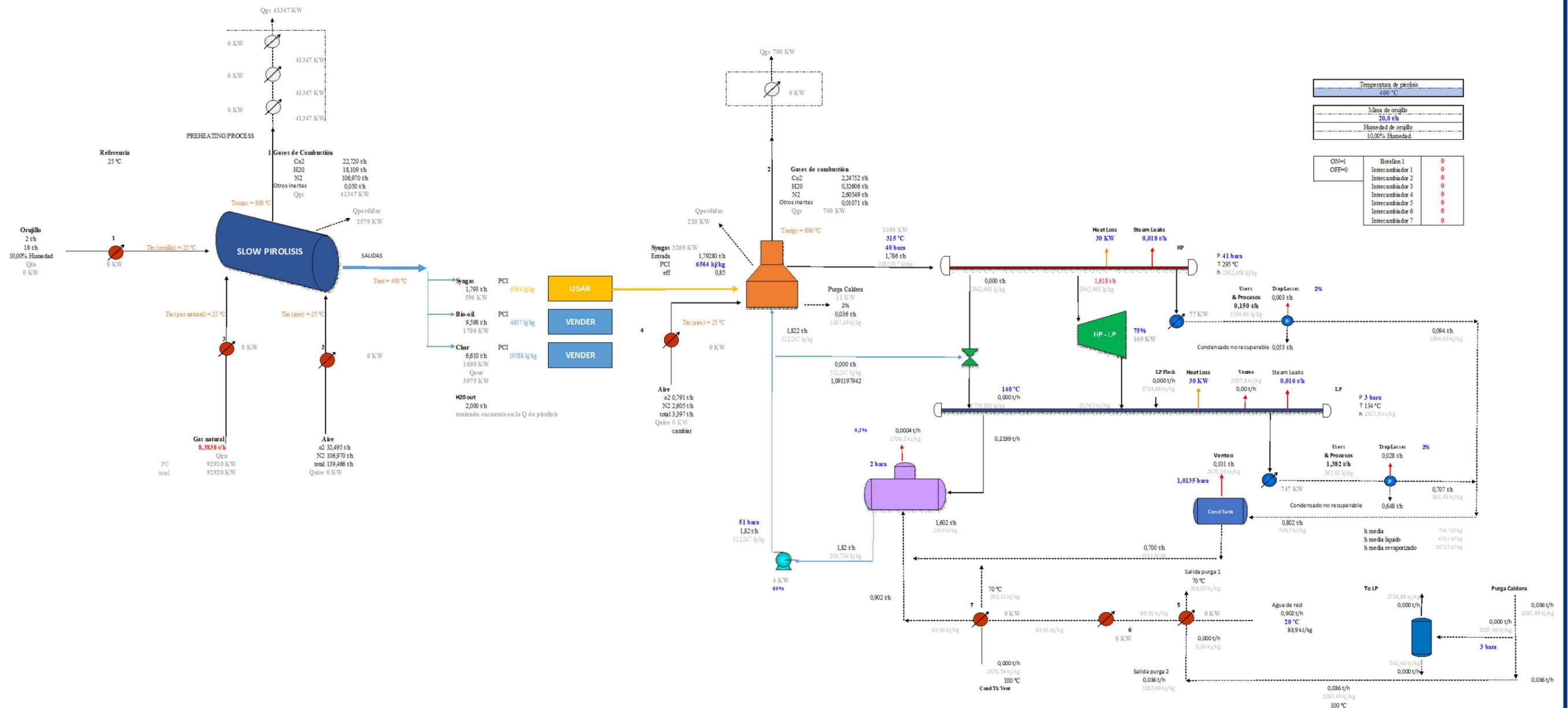
Energía consumida en la pirólisis	
400 °C	6250 kJ/kg
500 °C	8750 kJ/kg
600 °C	10000 kJ/kg

Tabla 32 Datos utilizados para el balance de energía II, energía que consume el proceso de pirólisis

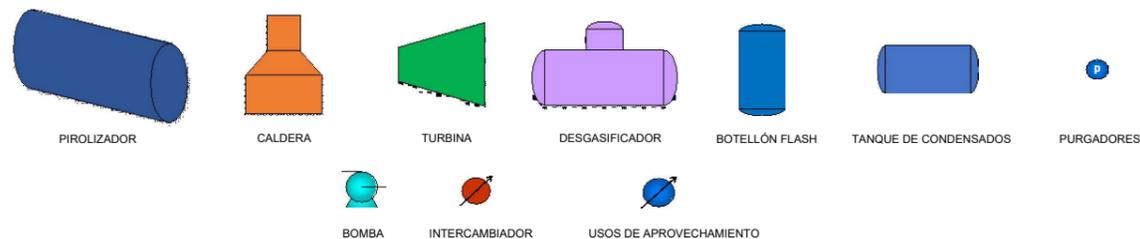
9.2. Diagramas de procesos.

A continuación se muestran los planos de procesos para cada uno de los casos estudiados procedentes del apartado 7.1 y 7.3

20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

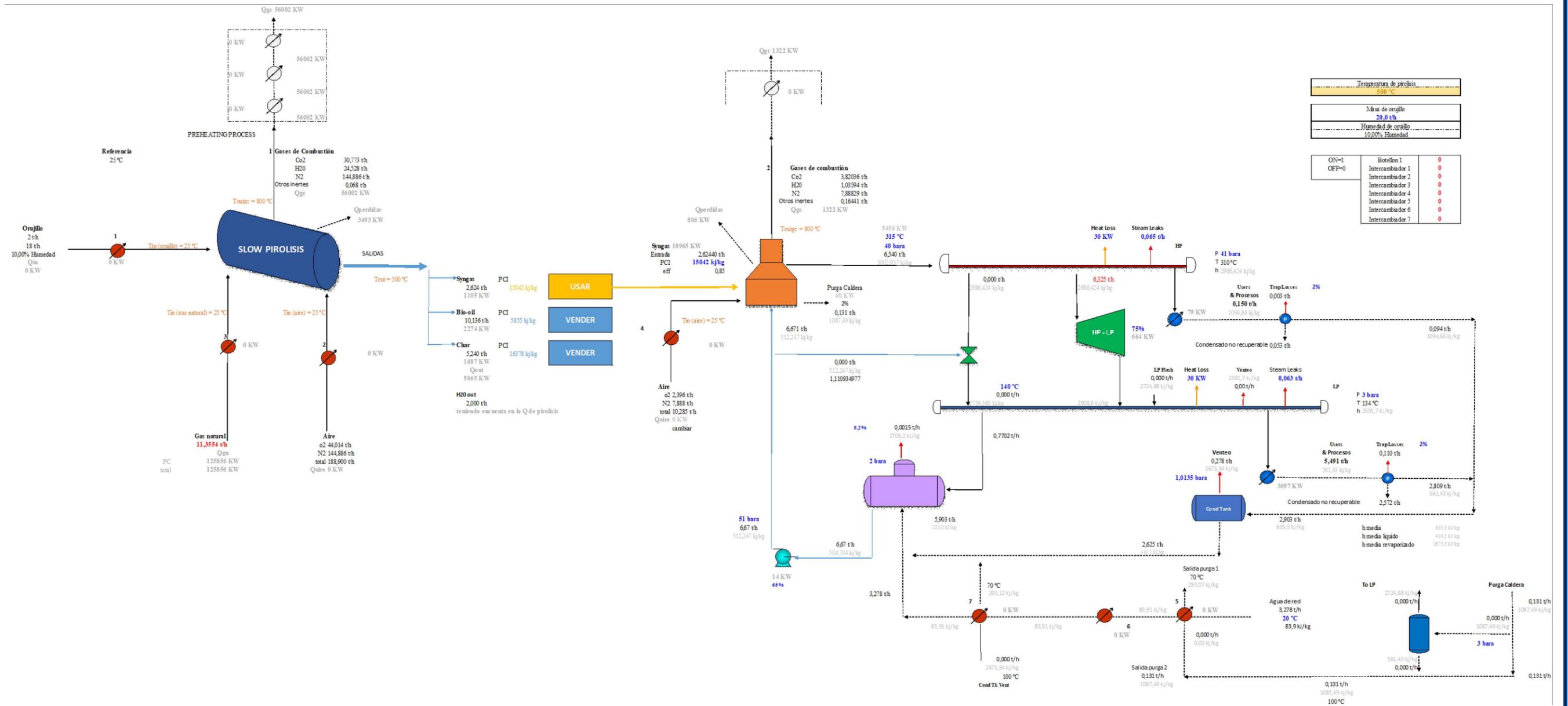
DRAWING No.:

01

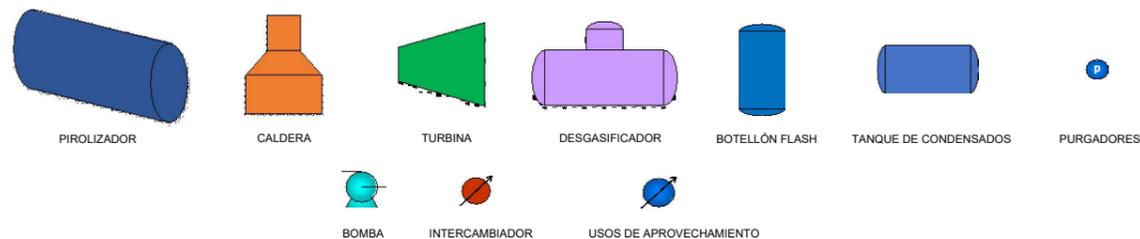
SHEET:

1 of 9

20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

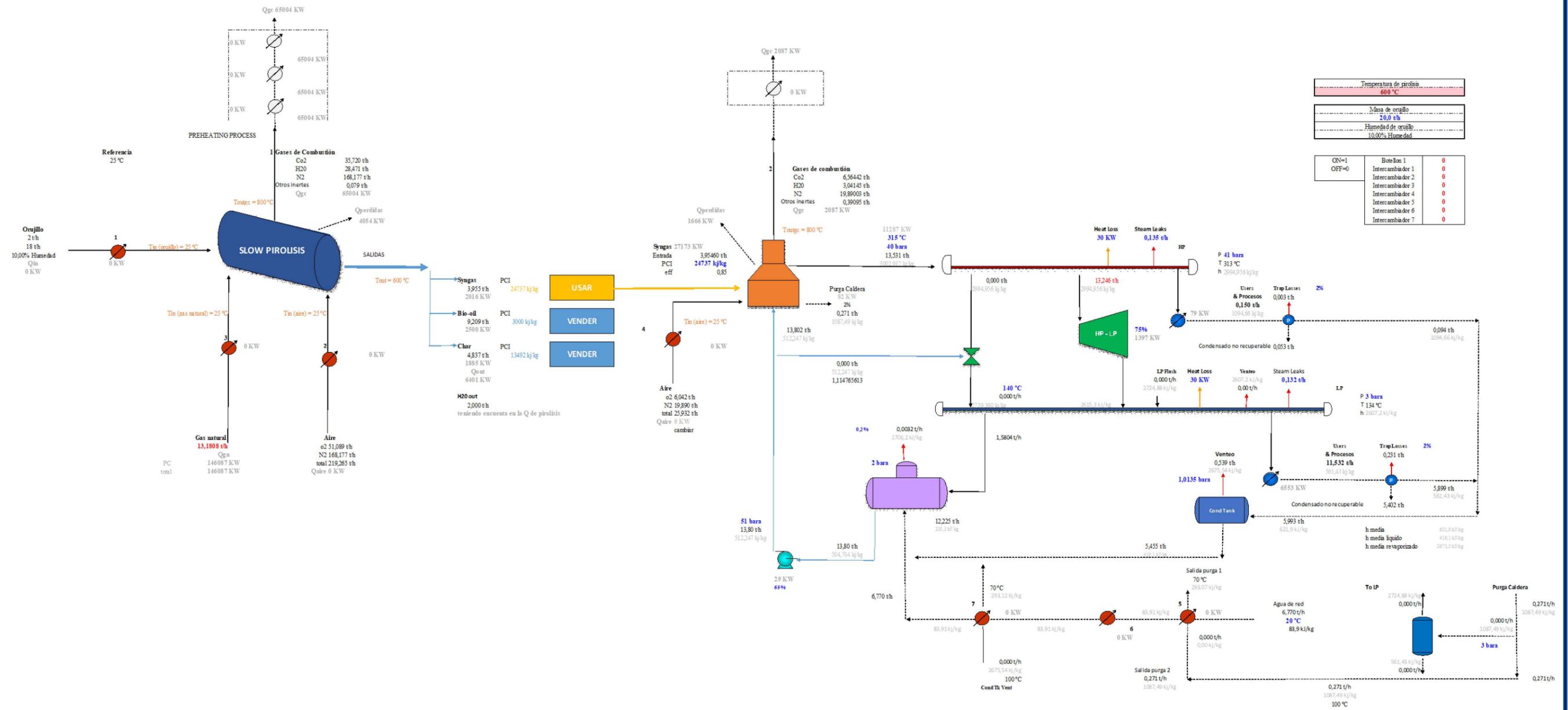
DRAWING No.:

01

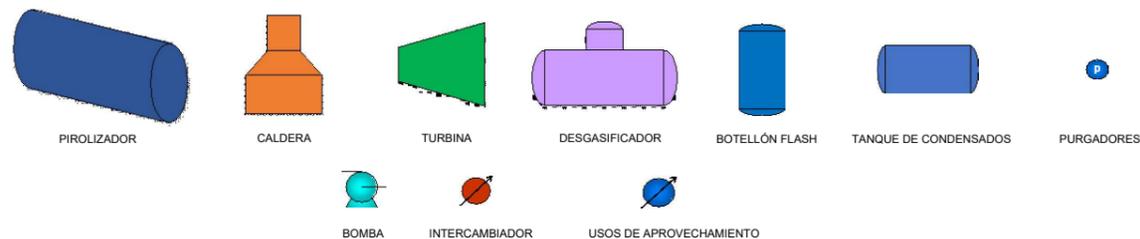
SHEET:

2 of 9

20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

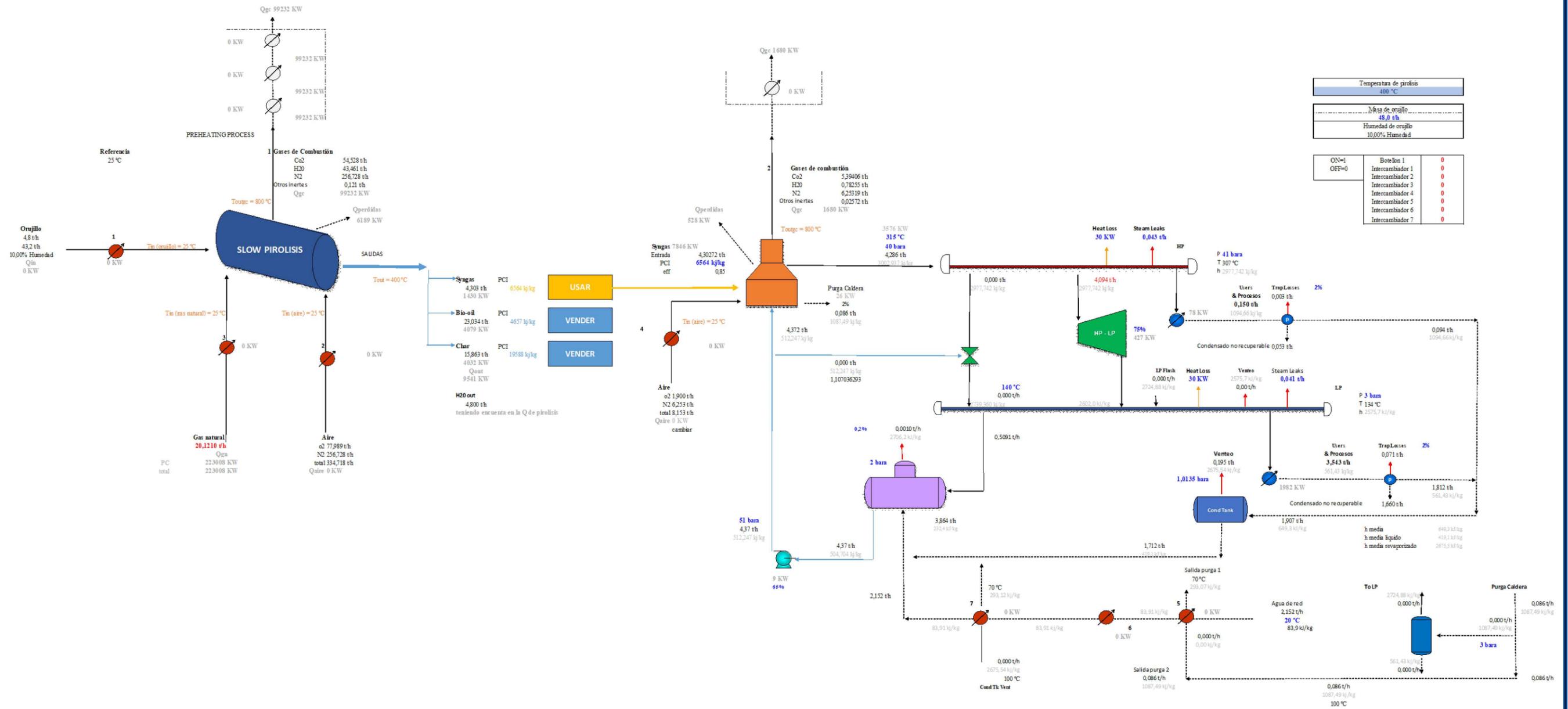
DRAWING No.:

01

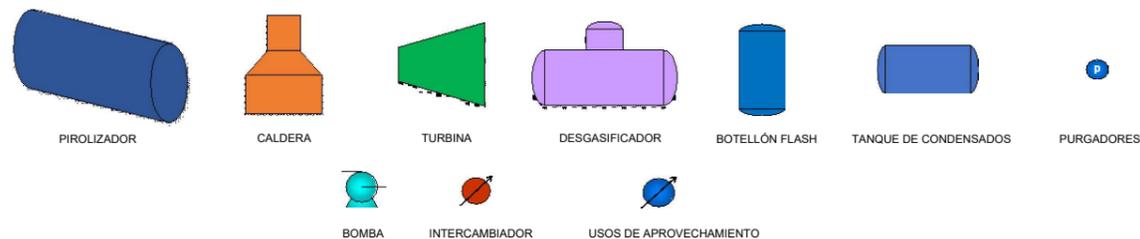
SHEET:

3 of 9

48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE:
SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

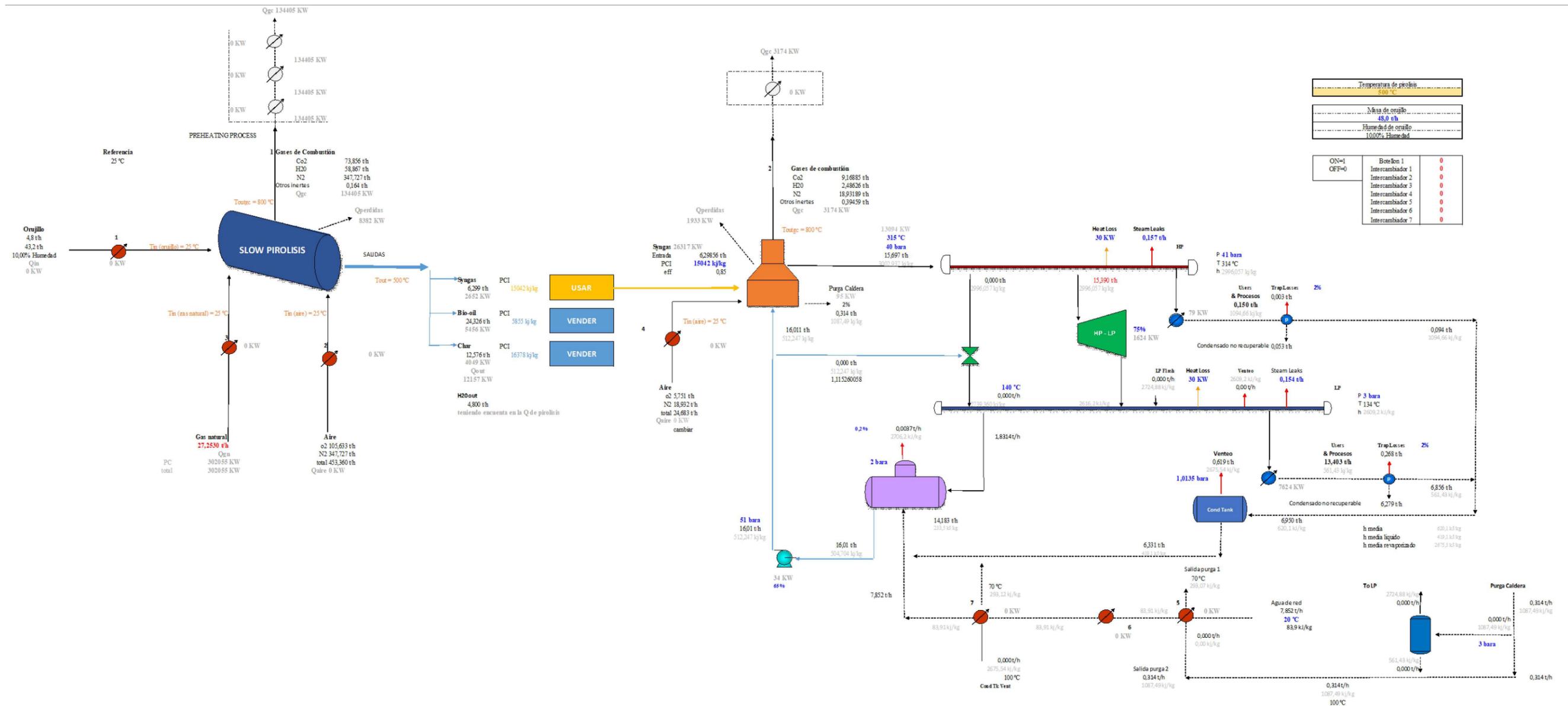
DRAWING No.:

01

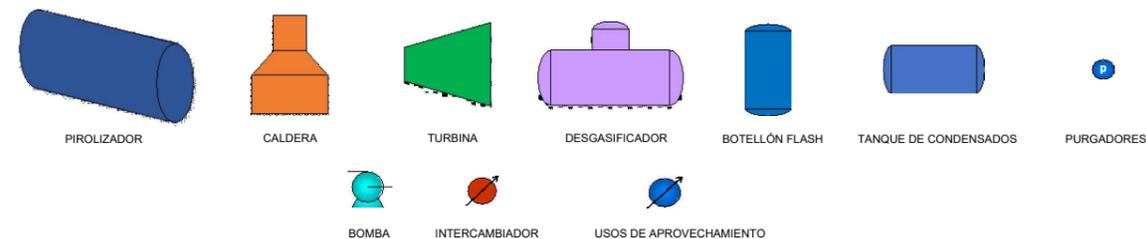
SHEET:

4 of 9

48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE:
SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

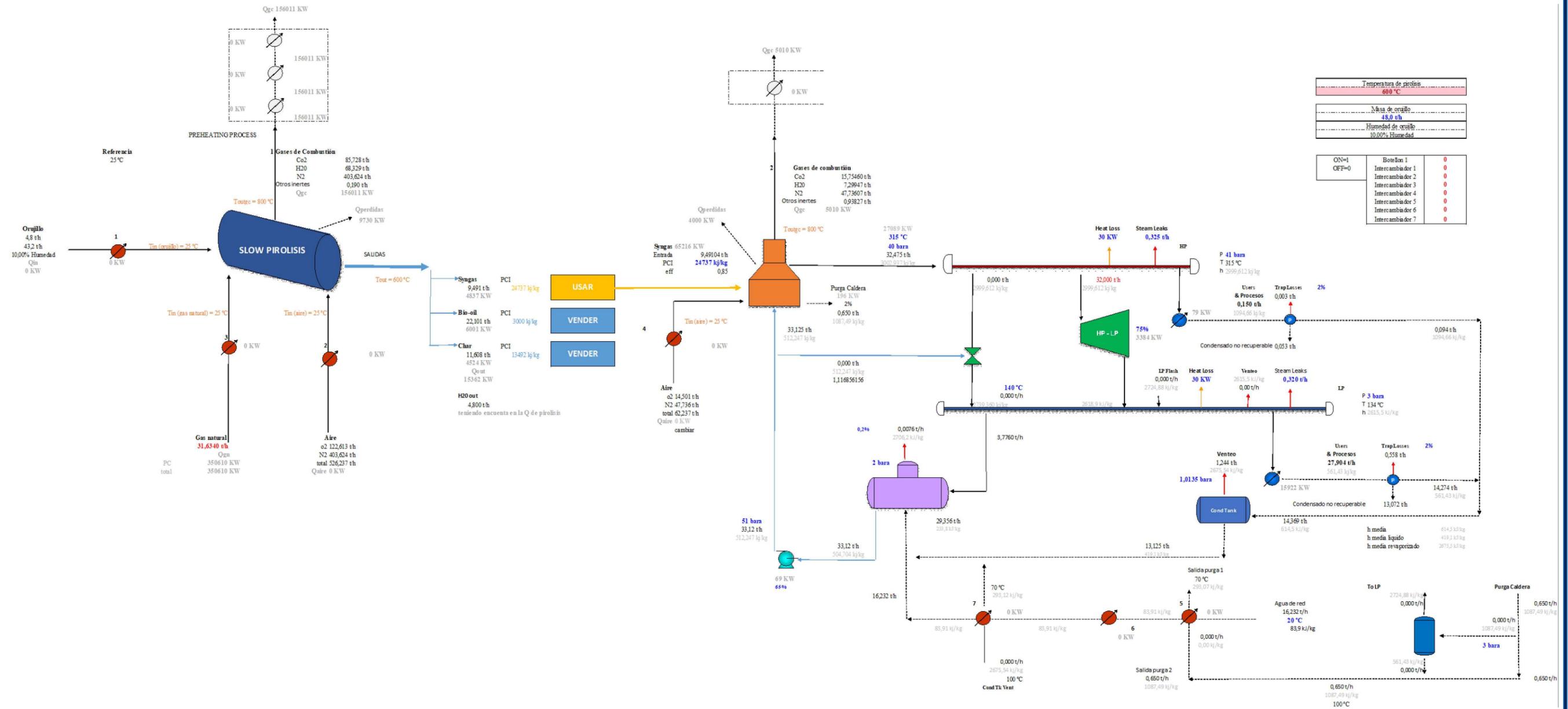
DRAWING No.:

01

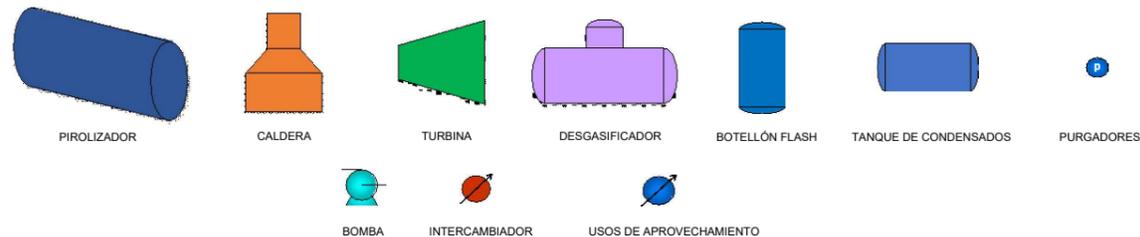
SHEET:

5 of 9

48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

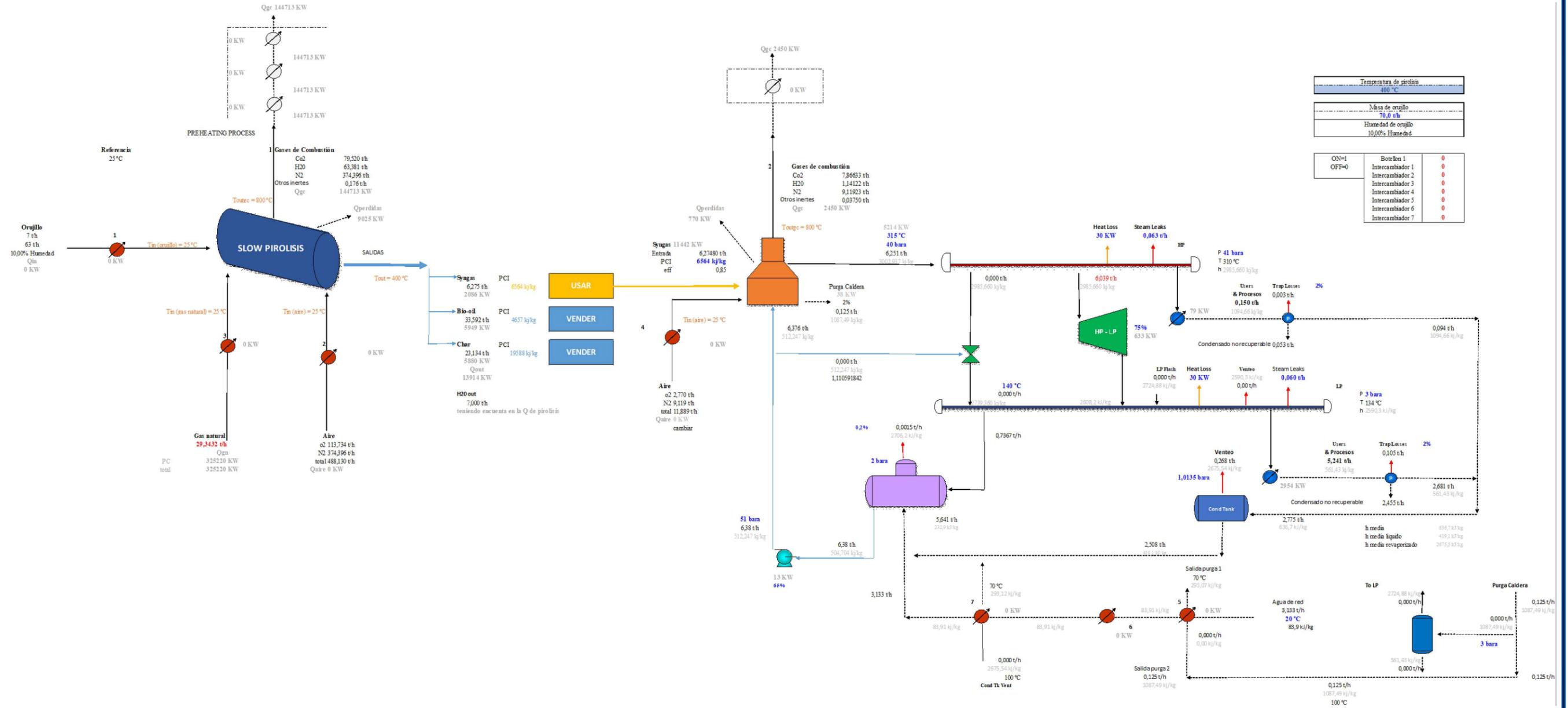
DRAWING No.:

01

SHEET:

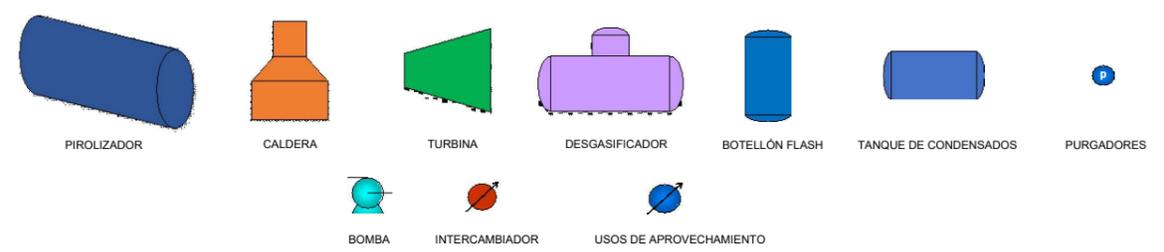
6 of 9

70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C



Temperatura de pirólisis		
400 °C		
Masa de orujillo		
70.0 t/h		
Humedad de orujillo		
10.00% Humedad		
ON=1	Botellón 1	0
OFF=0	Intercambiador 1	0
	Intercambiador 2	0
	Intercambiador 3	0
	Intercambiador 4	0
	Intercambiador 5	0
	Intercambiador 6	0
	Intercambiador 7	0

LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C

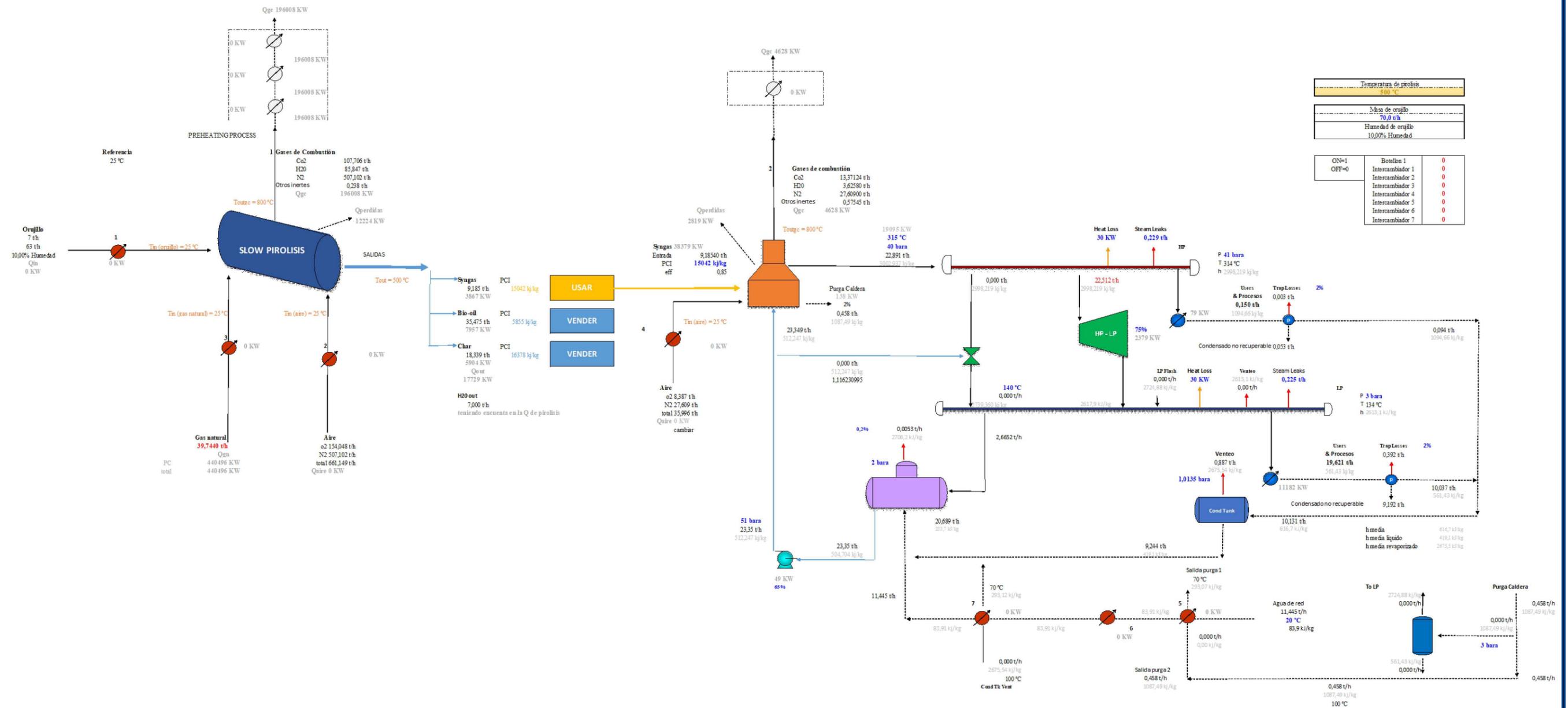
SCALE: S/E

NOMBRE

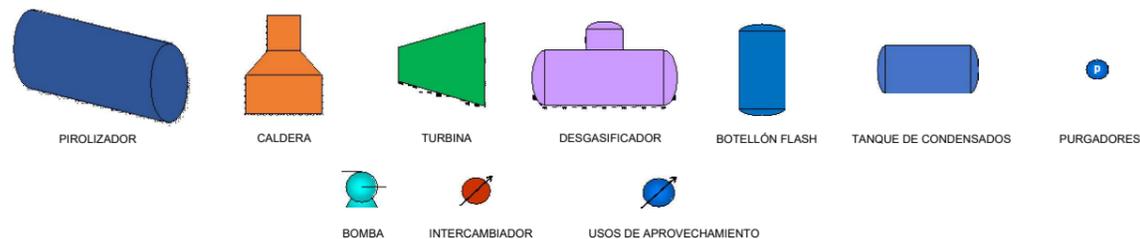
DIAGRAMA DE PROCESOS

DRAWING No.: 01 SHEET: 7 of 9

70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE:
SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

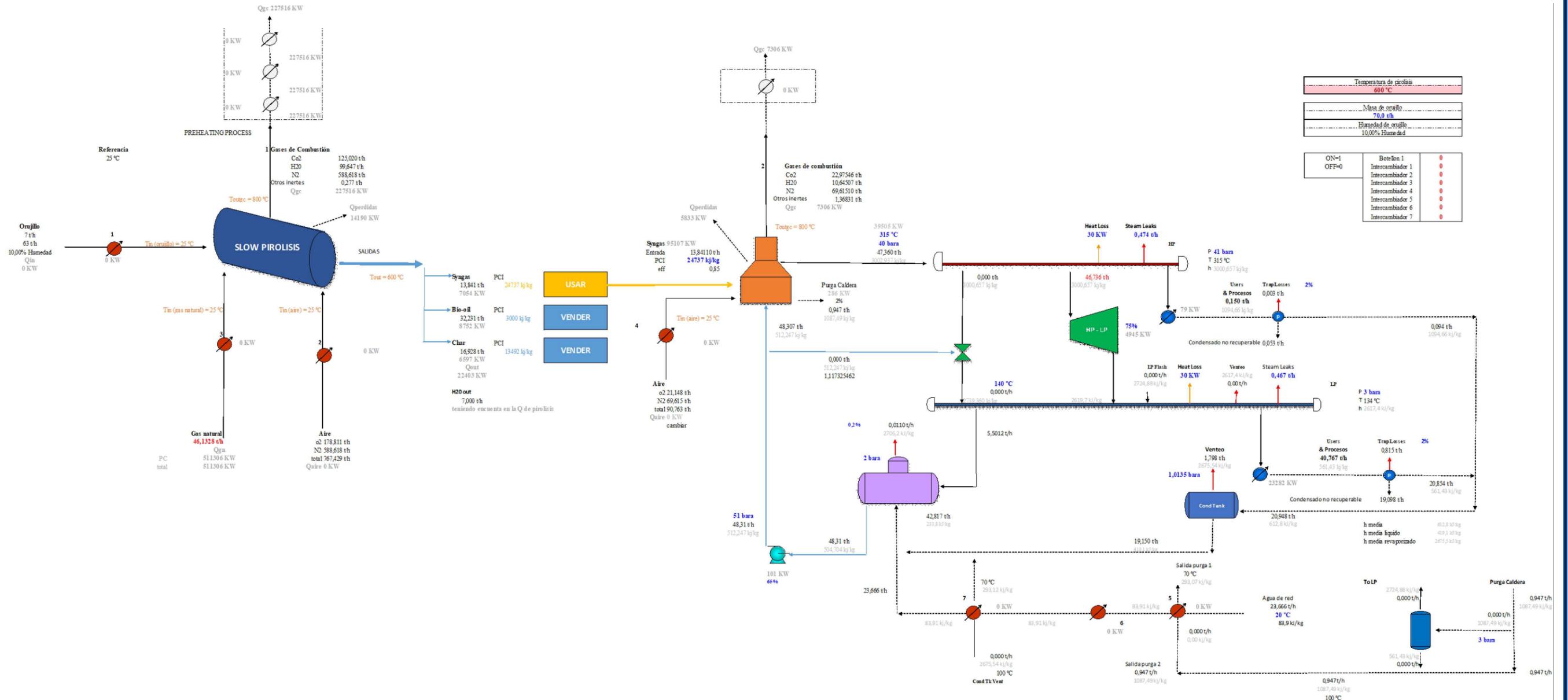
DRAWING No.:

01

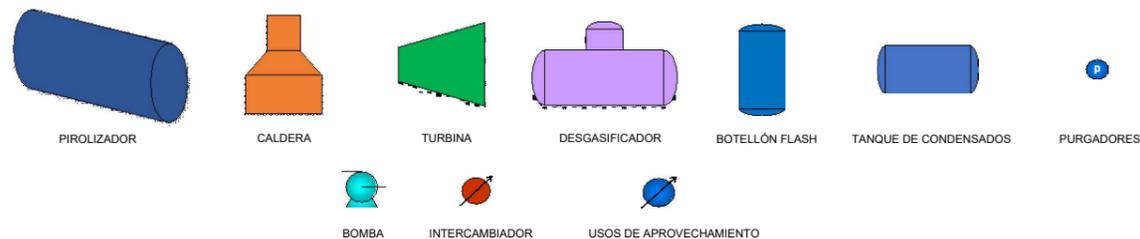
SHEET:

8 of 9

70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO BASE: 70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

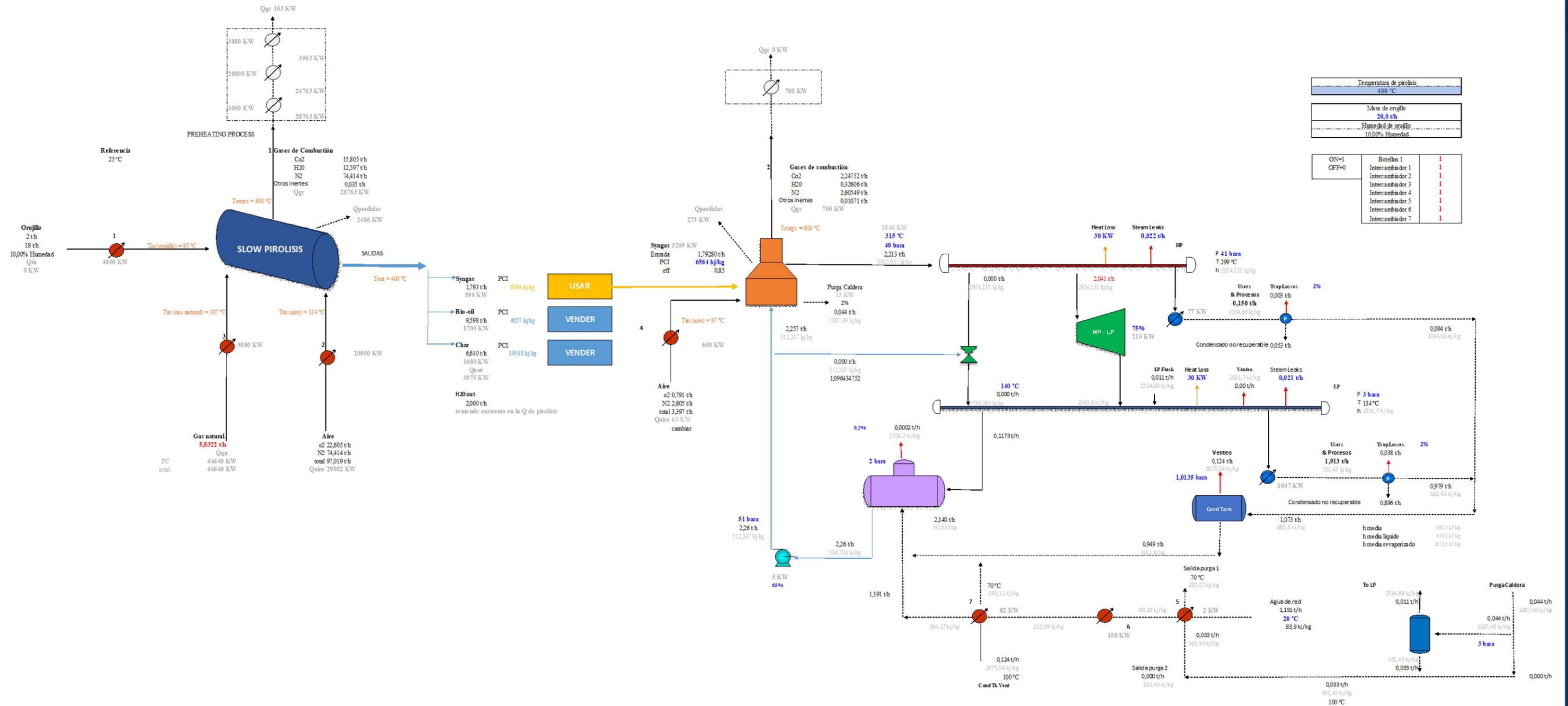
DRAWING No.:

01

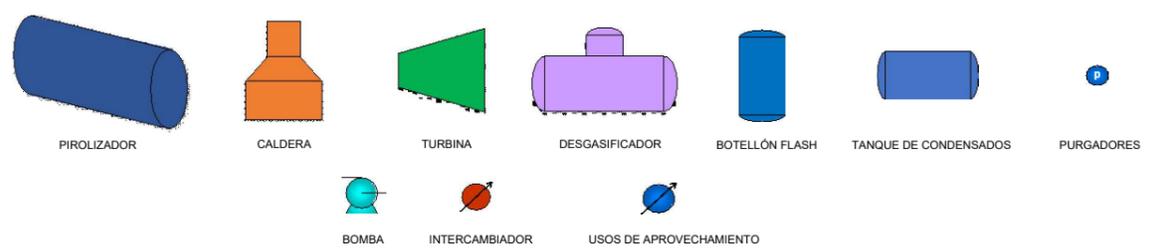
SHEET:

9 of 9

20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400° CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS

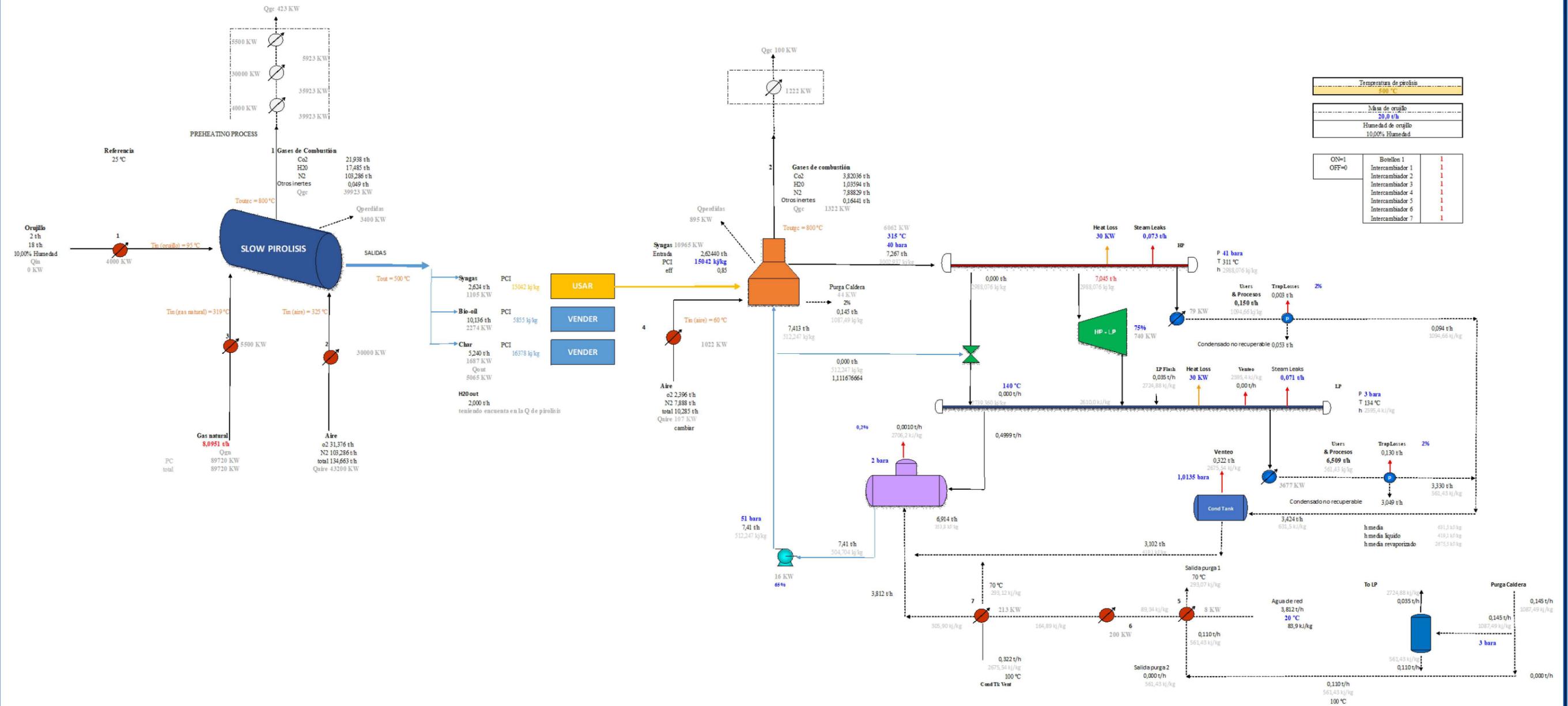


LEGENDA:

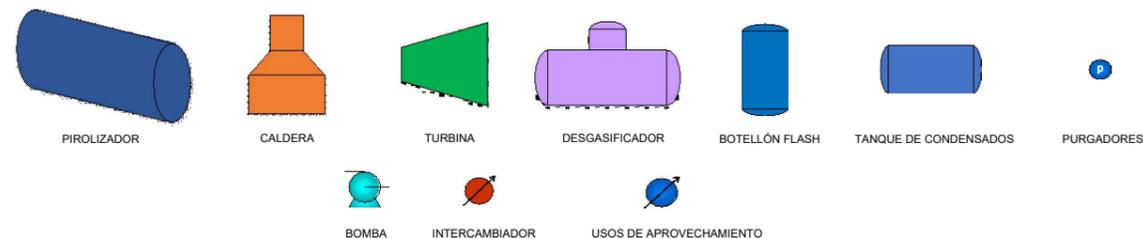


PROYECTO	ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO		
PROYECTO DE FIN DE GRADO	INGENIERÍA DE LA ENERGÍA		
CASO:	CASO PRECALENTAMIENTO: 20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C		DATE: SEP/2021
NOMBRE	DIAGRAMA DE PROCESOS		SCALE: S/E
	DRAWING No.:	01	SHEET: 1 of 9

20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE:
SEP/2021

CASO:

CASO PRECALENTAMIENTO: 20 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

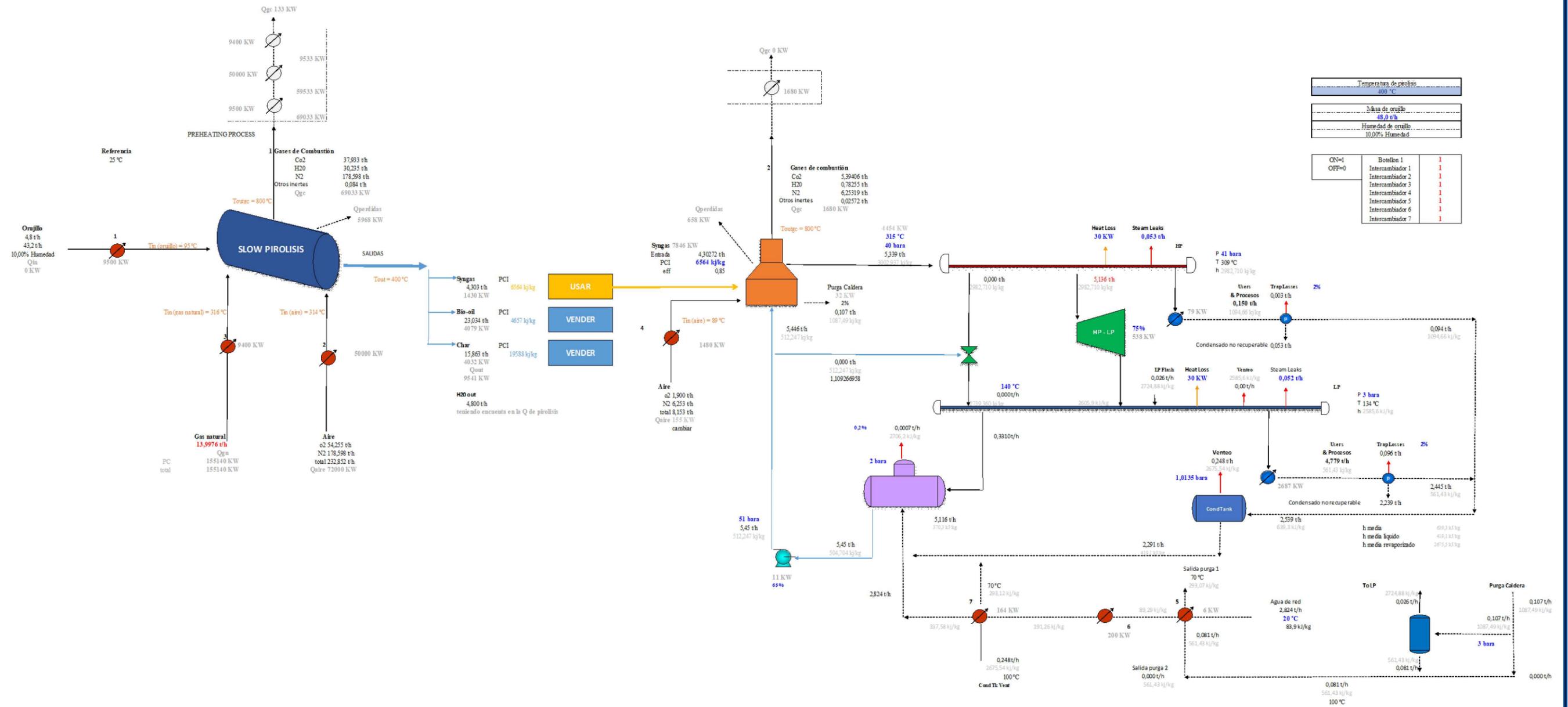
DRAWING No.:

01

SHEET:

2 of 9

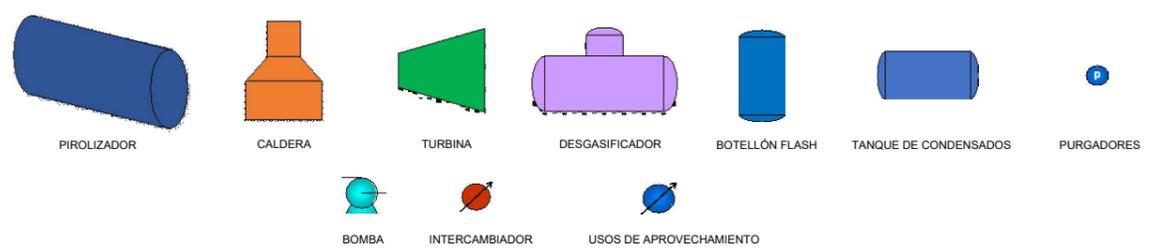
48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS



Temperatura de pirólisis	400 °C
Masa de orujillo	48.0 t/h
Humedad de orujillo	10.00% Humedad

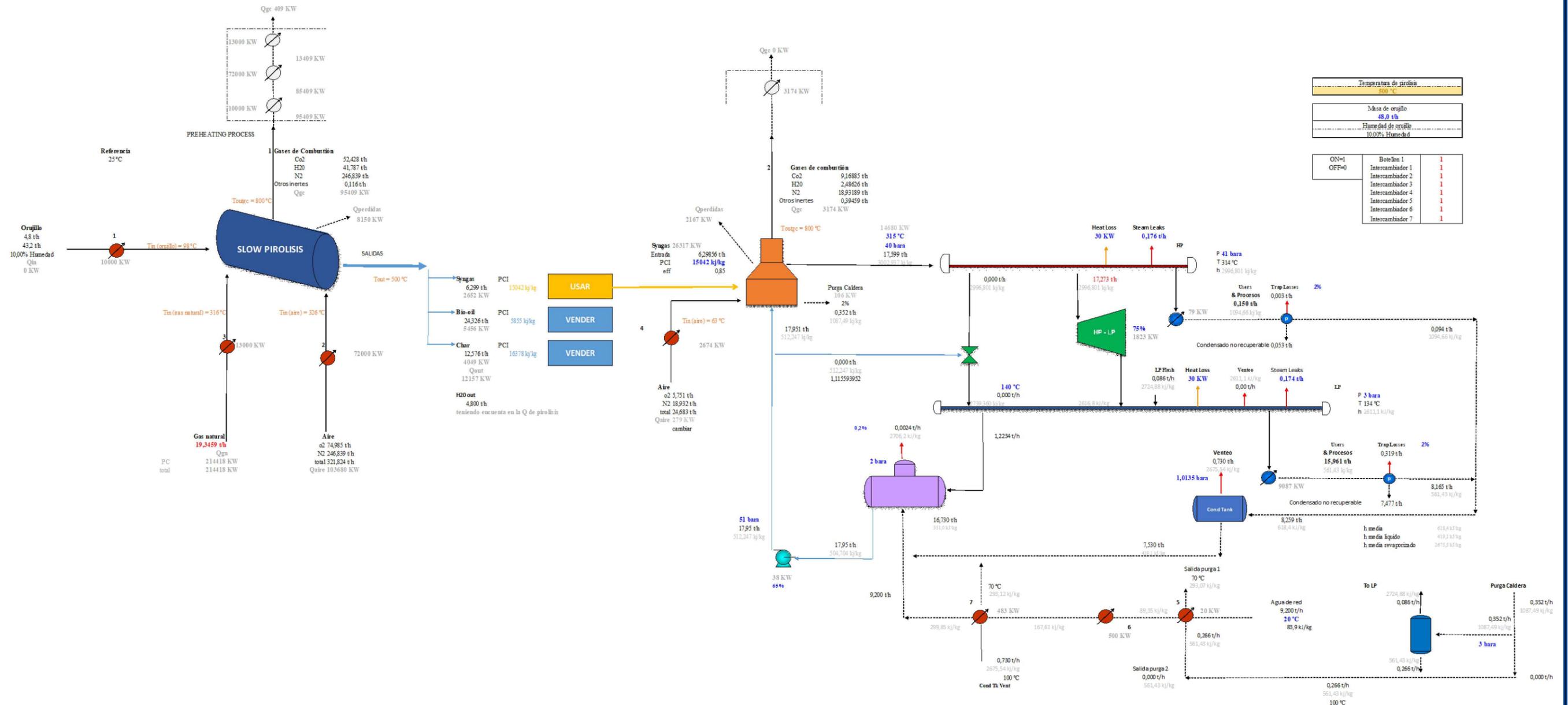
CN=1	Botellón 1	1
OFF=0	Intercambiador 1	1
	Intercambiador 2	1
	Intercambiador 3	1
	Intercambiador 4	1
	Intercambiador 5	1
	Intercambiador 6	1
	Intercambiador 7	1

LEGENDA:



PROYECTO	ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO		Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA
PROYECTO DE FIN DE GRADO	INGENIERÍA DE LA ENERGÍA		
CASO:	CASO PRECALENTAMIENTO: 48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 400°C		SCALE: S/E
NOMBRE	DIAGRAMA DE PROCESOS		DRAWING No.: 01 SHEET: 4 of 9

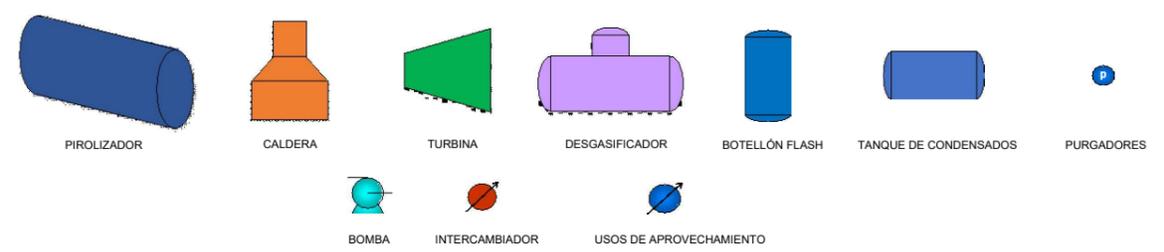
48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS



Temperatura de pirólisis	500 °C
Masa de orujillo	48.0 t/h
Humedad de orujillo	10.00% Humedad

ON=1	Botellón 1	1
OFF=0	Intercambiador 1	1
	Intercambiador 2	1
	Intercambiador 3	1
	Intercambiador 4	1
	Intercambiador 5	1
	Intercambiador 6	1
	Intercambiador 7	1

LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO PRECALENTAMIENTO: 48 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C

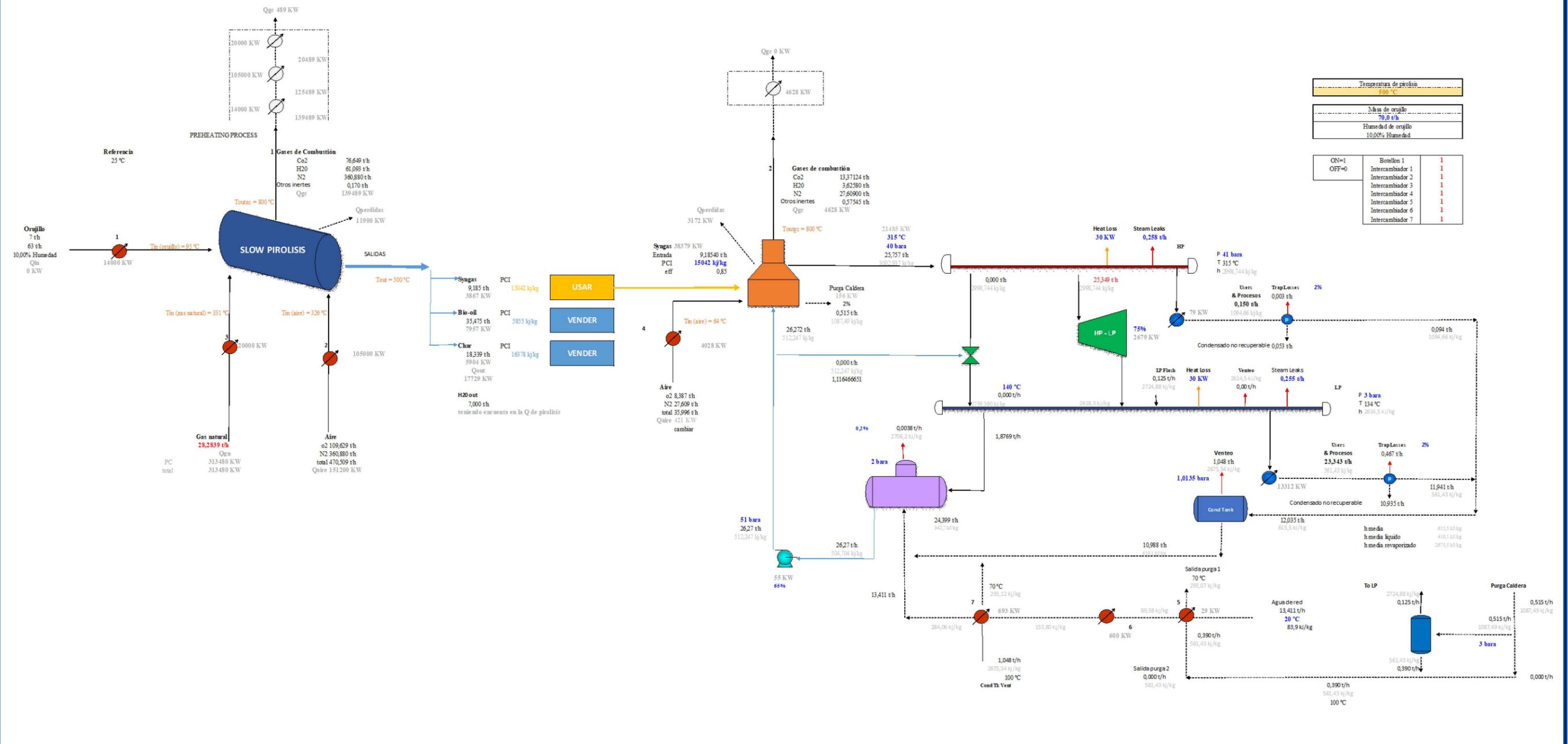
SCALE: S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

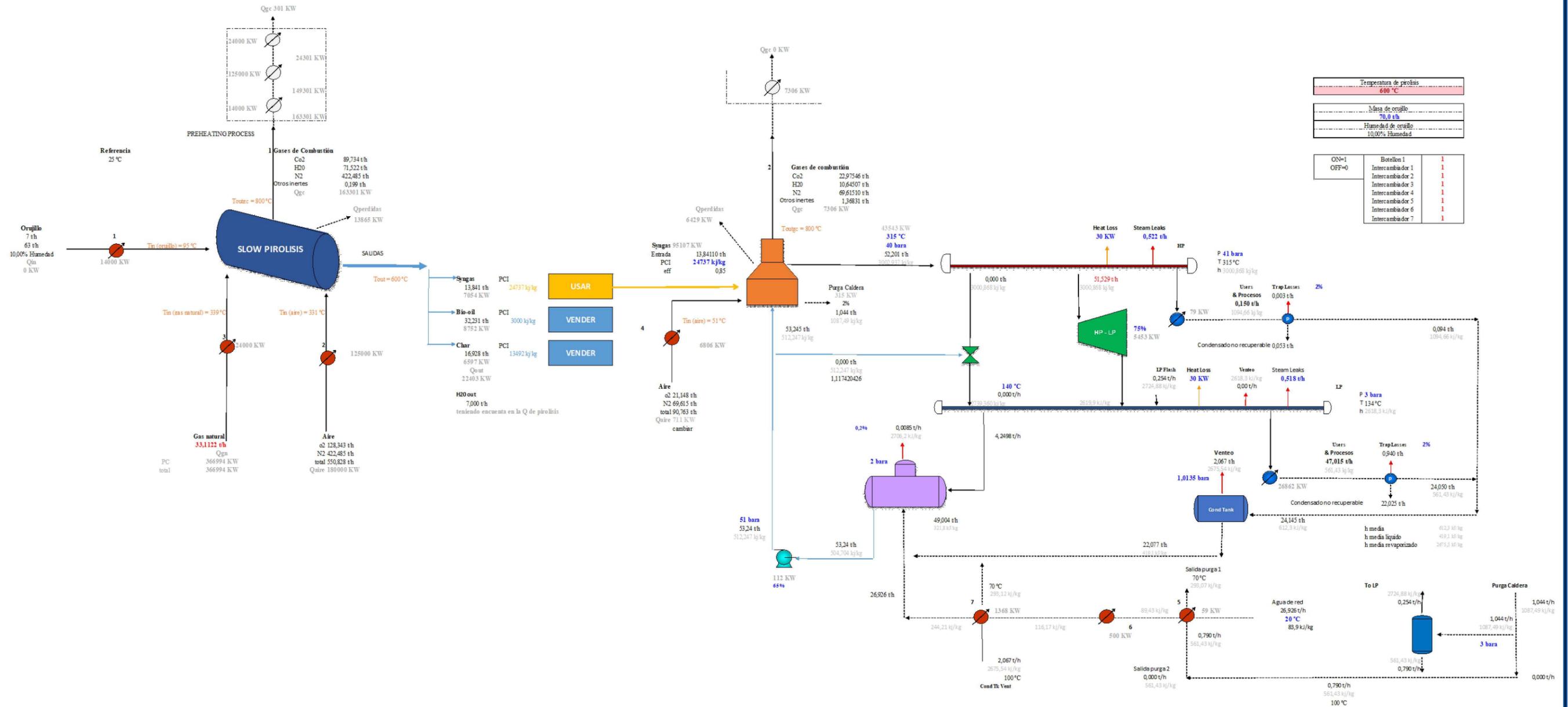
DRAWING No.: 01
SHEET: 5 of 9

70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS

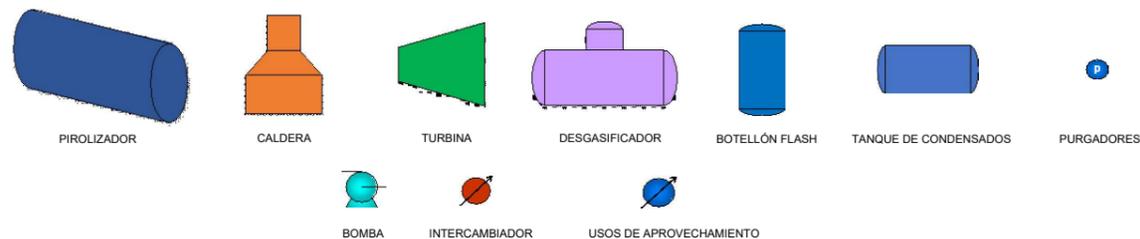


PROYECTO	ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO		Escuela Técnica Superior de INGENIERÍA DE SEVILLA
PROYECTO DE FIN DE GRADO	INGENIERÍA DE LA ENERGÍA		
CASO:	CASO PRECALENTAMIENTO: 70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 500°C		DATE: SEP/2021
NOMBRE	DIAGRAMA DE PROCESOS		SCALE: S/E
	DRAWING No.:	01	SHEET: 8 of 9

70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C CON INTERCAMBIADORES PRECALENTADORES ACTIVOS



LEGENDA:



PROYECTO

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE VALORIZACIÓN DEL ORUJILLO



PROYECTO DE FIN DE GRADO

INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

DATE: SEP/2021

CASO:

CASO PRECALENTAMIENTO: 70 TONELADAS ORUJILLO TEMPERATURA DE PIRÓLISIS 600°C

SCALE:

S/E

NOMBRE

DIAGRAMA DE PROCESOS

DRAWING No.:

01

SHEET:

9 of 9

10. BIBLIOGRAFÍA

- AEAS (2020) 'Agua de red'. <https://www.aeas.es/>.
- Fiorentino, A. *et al.* (2003) 'Environmental effects caused by olive mill wastewaters: toxicity comparison of low-molecular-weight phenol components', *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(4), pp. 1005–1009. doi:10.1021/JF020887D.
- Agabo García, C. (2018) 'Aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación en el tratamiento de las aguas residuales de la industria oleícola'.
- Aguilera, J. *et al.* (2010) 'Adaptive evolution of baker's yeast in a dough-like environment enhances freeze and salinity tolerance: Evolutionary selection for freeze tolerance', *Microbial Biotechnology*, 3(2), pp. 210–221. doi:10.1111/j.1751-7915.2009.00136.x.
- Alba Mendoza, J. *et al.* (1996) 'Características de los aceites de primera y segunda centrifugación', *Grasas y Aceites*, 47. doi:10.3989/gya.1996.v47.i3.857.
- Arias, T.S. (2019) *Universidad de Sevilla Facultad de Farmacia DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DEL ACEITE DE OLIVA VIRGEN RELACIONADOS CON ENFERMEDADES CANCERÍGENAS Y NEURODEGENERATIVAS*.
- Barry, D. *et al.* (2019) 'Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge', *Biomass and Bioenergy*, 122, pp. 472–480. doi:10.1016/J.BIOMBIOE.2019.01.041.
- Béjar Heredia, M. de la Cruz. (2012) *Obtención de aceites de orujo de oliva (UF1086)*, IC Editorial. Málaga: IC Editorial.
- Beltrán Maza, G., Jiménez Marquez, A. and Aguilera Herrera, M.P. (2006) 'Empleo de ultrasonidos de potencia en el proceso de elaboración del aceite de oliva virgen', *Grasas y aceites*, 57.
- La cal herrera, J.A. (2013) *Viabilidad de la integración de una planta de gasificación de biomasa*. Universidad de Jaén, Escuela politécnica superior.
- Callejo López, J.A., Parra Heras, T. and Manrique Gordillo, T. (2015) *Evaluación de la producción y usos de los subproductos de las agroindustrias del olivar en Andalucía, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo*. doi:10.13140/RG.2.2.14921.39520.
- CAR/PL (2000) 'Prevención de la contaminación en la producción de aceite de oliva', *Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL)*, p. 138.
- Cerretani, L., Gómez Caravaca, A.M. and Bendini, A. (2009) *El Aceite de Oliva Virgen: Tesoro de Andalucía. Capítulo 6: Aspectos tecnológicos de la producción del aceite de oliva*. Málaga: Fundación Unicaja.
- Cortés Delgado, A. (2013) 'Transformación de la grasa de las aceitunas de mesa durante el proceso de elaboración'.
- Devon Barry, Chiara Barbiero, Cedric Briens, Franco Berruti (2018) 'Effect of crushing temperature on virgin olive oil quality and composition', *Grasas y Aceites*, 69(1), pp. e239–e239. doi:10.3989/gya.0559171.
- Esencia de olivo (2021). <http://www.esenciadeolivo.es/>.
- Fernández Orío, D. (2012) *Almazara de aceite virgen extra en Alfaro. PROYECTO FIN DE CARRERA*. La Rioja.
- Fernández-Akarregi A, Makibar J, Lopez G, Amutio M, Olazar M. Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25 kg/h) for biomass fast pyrolysis. *Fuel Processing Technology* 2013; 112: 48-56.
- Fortini, M. *et al.* (2015) 'Shelf life and quality of olive oil filtered without vertical centrifugation', *European Journal of Lipid Science and Technology*, 118. doi:10.1002/ejlt.201500229.

- García Saavedra, A.J. (2014) *Nueva almazara de aceite de oliva en Castro del Río (Córdoba) Proyecto Fin de Carrera*.
- Giovacchino, L., Sestili, S. and Vincenzo, D.D. (2002) 'Influence of olive processing on virgin olive oil quality'. doi:10.1002/1438-9312(200210)104:9/10<587::AID-EJLT587>3.0.CO;2-M.
- Guardia Rubio, M. (2009) *Evaluación de la efectividad del lavado de aceituna sobre la eliminación de residuos de plaguicidas nuevas metodologías analíticas y situación real en almazaras*. Universidad de Jaén, servicio de publicaciones.
- Guerrini, L. et al. (2018) 'Stripping of dissolved oxygen from extra virgin olive oil: Effects on oxidation and biophenols', *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(12), p. e13832. doi:10.1111/jfpp.13832.
- Iglesias Loredó, R. (2019) *Valorización energética del orujillo de aceituna*.
- IOOC (2021) *Elixir of life*, *International Olive Council*. Available at: <https://www.internationaloliveoil.org/the-elixir-of-long-life/> (Accessed: 9 September 2021).
- Lozano, F.E. (2000) 'Centrifugación de la pasta de aceituna para la obtención de aceite de oliva virgen', *Alimentación Equipos Y Tecnología*, pp. 71–78.
- Martínez Álvarez, J.R. et al. (2005) 'El aceite de oliva y la dieta mediterránea', *Nutrición y salud*, pp. 3–93.
- Masella, P. et al. (2009) 'Influence of Vertical Centrifugation on Extra Virgin Olive Oil Quality', *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(11), p. 1137. doi:10.1007/s11746-009-1445-9.
- Masella, P. et al. (2012) 'Vertical centrifugation of virgin olive oil under inert gas', *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114(9), pp. 1094–1096. doi:10.1002/ejlt.201100400.
- M^a Luisa Delgado Barajas, 2007. Diseño de una planta industrial de elaboración de aceite de oliva. Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Química. Universidad de Cádiz.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2021) *AICA: Agencia de Información y Control Alimentarios*. Available at: <https://www.aica.gob.es/> (Accessed: 9 September 2021).
- Mulet, A. et al. (2003) 'New Food Drying Technologies - Use of Ultrasound', *Food Science and Technology International*, 9(3), pp. 215–221. doi:10.1177/1082013203034641.
- Niaounakis, Michael. (2006) *Olive processing waste management literature review and patent survey*, Elsevier.
- 'Olea europaea – Árboles y Arbustos' (2021). Available at: <https://www.arbolesyarbustos.com/fichas-especies/olea-europaea/> (Accessed: 8 September 2021).
- Pariante Gómez, M. del C. (2016) *Instalación de tratamiento de aguas residuales de almazara*.
- Sanchez Moral, P. and Ruiz-Méndez, M.V. (2006) 'Production of pomace olive oil', *Grasas y Aceites*, 57, pp. 47–55. doi:10.3989/gya.2006.v57.i1.21.
- Sánchez Muniz, F.J. (2009) 'Aceite de oliva, clave de vida en la Cuenca Mediterránea', *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia*, 73, pp. 653–692.
- Sánchez Narbón, B. (2017) 'El diseño de almazaras como aportación a la cultura olivarera'.
- Selectra (2021) 'Precio del gas natural y generación eléctrica'. <https://selectra.es/>.
- TD/OLIVE OIL.10/6 (2005) 'No. 47662 Multilateral - International agreement on olive oil and table olives, 2005', in, pp. 63–258. doi:10.18356/be9114a7-en-fr.
- Urien Pinedo, A. (2013) '*OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL*'.

Vermichar (2021) 'Precio char y bio-oil'. <https://www.vermichar.es/>.