

Trabajo Fin de Carrera

Ingeniería Química

Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo

Autor: Plácido Siria López

Tutor: Benito Navarrete Rubia

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Carrera
Ingeniería Química

Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo

Autor:

Plácido Siria López

Tutor:

Benito Navarrete Rubia

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

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Carrera: Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo

Autor: Plácido Siria López

Tutor: Benito Navarrete Rubia

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a toda mi familia todo el apoyo y el cariño recibido durante toda mi vida, así como la educación y los valores transmitidos desde mi infancia. Por esa razón, les dedico este trabajo fin de grado a ellos principalmente.

En segundo lugar, agradecer a la empresa el gran trato recibido, así como la disponibilidad y simpatía de todos los trabajadores que conforman la empresa.

Por último, agradecer a Benito Navarrete Rubia por haberme ofrecido la posibilidad de realizar el proyecto, además de su ayuda y su implicación durante estos meses de trabajo. Mencionar también a Marina Gallego Fernández por su gran apoyo durante los meses iniciales de proyecto.

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado el diseño de la alternativa de control de partículas más apropiada desde un punto de vista técnico-económico con objeto de cumplir la legislación actual vigente en una planta de extracción de aceite de orujo.

En primer lugar, se ha realizado una descripción de las posibles alternativas de control de partículas existentes en la actualidad, con objeto de seleccionar aquellas alternativas que puedan ser válidas. Posteriormente, se realiza el dimensionado de las distintas alternativas previamente seleccionadas.

Por último, se desarrolla un análisis económico con objeto de discutir las diferentes alternativas y seleccionar la opción de control más adecuada.

Abstract

In this Final Degree Project the design of the most appropriate particle control alternative has been made from a technical-economic point of view in order to comply with the current legislation in force at a pomace oil extraction plant.

In the first place, a description of the possible control alternatives for existing particles has been made, in order to select those alternatives that may be valid. Subsequently, the sizing of the different previously selected alternatives is carried out.

Finally, an economic analysis is developed in order to discuss the different alternatives and select the most appropriate option.

Índice

Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xiii
1 Antecedentes	1
2 Introducción	2
2.1. <i>Extractoras dentro del marco general del sector oleícola</i>	2
2.2. <i>Problemática medioambiental</i>	3
3 Objetivos y Alcance	5
4 Metodología de trabajo	6
5 Memoria descriptiva	7
5.1 <i>Descripción del proceso</i>	7
5.1.1 Extracción de aceite de semillas oleaginosas	7
5.1.2 Extracción de aceite de orujo de aceitunas	10
5.2 <i>Bases de partida</i>	14
5.3 <i>Identificación de alternativas</i>	17
5.3.1. Separadores húmedos	17
5.3.2. Separadores mecánicos	18
5.3.3. Filtros de mangas	19
5.3.4. Precipitador electrostático (PES)	21
5.4 <i>Propuesta de alternativas para el control de partículas</i>	22
5.4.1. Aerorefrigerador	26
5.4.2. Precalentador de aire	26
6 Memoria de cálculo	31
6.1. <i>Análisis de grados de libertad</i>	33
6.2. <i>Balance de materia y energía</i>	36
6.3. <i>Prediseño de equipos</i>	41
6.3.1. Precalentador de aire	41
6.3.2. Aerorefrigerador	46
6.3.3. Filtro de mangas	49
6.3.4. Precipitador electrostático	54
6.4. <i>Análisis económico</i>	57
6.4.1. Precalentador de aire	57
6.4.2. Aerorefrigerador	59
6.4.3. Filtro de mangas	61
6.4.4. Precipitador electrostático	65

7	Selección final de alternativas	68
	<i>7.1. Reducción temperatura</i>	<i>68</i>
	<i>7.2. Captación de partículas</i>	<i>69</i>
8	Hoja de especificaciones	70
	8.1. Precalentador de aire	70
	8.2. Filtro de mangas	72
9	Diseño final	74
	<i>9.1. Tolva filtro de mangas</i>	<i>74</i>
	<i>9.2. Válvula rotativa</i>	<i>77</i>
	<i>9.3. Tornillo sin fin</i>	<i>79</i>
	<i>9.4. Elevador de cangilones</i>	<i>81</i>
	<i>9.5. Silo de almacenamiento</i>	<i>83</i>
10	Conclusión	85
Anexos		86
	<i>Anexo 1: Precalentador de aire</i>	<i>86</i>
	<i>Anexo 2: Aerorefrigerador</i>	<i>86</i>
	<i>Anexo 3: Filtro de mangas</i>	<i>87</i>
	<i>Anexo 4: Precipitador electrostático</i>	<i>88</i>
Referencias		89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Mediciones contaminantes	4
Tabla 2: Hoja de especificación caldera de vapor	14
Tabla 3: Horas de actividad	14
Tabla 4: Eficacia requerida	15
Tabla 5: Comparativa distintas alternativas equipos de captación	23
Tabla 6: Datos de partida	31
Tabla 7: Análisis completo del orujillo	32
Tabla 8: Resolución cálculo de grados de libertad	35
Tabla 9: Propiedades termodinámicas	37
Tabla 10: Flujo molar de los componentes del combustible	37
Tabla 11: Resolución balance de materia y energía	39
Tabla 12: Datos de partida diseño precalentador	41
Tabla 13: Disposición del precalentador	43
Tabla 14: Pérdida de carga	44
Tabla 15: Ahorro de combustible	44
Tabla 16: Datos de partida aerorefrigerador	46
Tabla 17: Caudal de aire requerido	46
Tabla 18: Características técnicas aerorefrigerador	46
Tabla 19: Número de tubos y longitud requerida.	47
Tabla 20: Determinación velocidad de filtración,	49
Tabla 21: Dimensionado filtro de mangas	50
Tabla 22: Pérdida de carga	52
Tabla 23: Superficie captura	54
Tabla 24: Dimensiones precipitador	55
Tabla 25: Pérdida de carga PES	56
Tabla 26: Coste precalentador de aire (1989)	57
Tabla 27: Estimación final precalentador	58
Tabla 28: Coste Aerorefrigerador (1982)	59
Tabla 29: Estimación final Aerorefrigerador	60
Tabla 30: Costes directos	62
Tabla 31: Costes indirectos	62
Tabla 32: Coste inversión filtro de mangas	64
Tabla 33: Coste final filtro de mangas	64
Tabla 34: Coste equipos auxiliares.	65
Tabla 35: Costes directos	66
Tabla 36: Costes indirectos	66

Tabla 37: Coste inversión Precipitador electrostático	67
Tabla 38: Coste final Precipitador electrostático	67
Tabla 39: Comparación costes de inversión	68
Tabla 40: Espacio requerido	68
Tabla 41: Comparación costes de inversión	69
Tabla 42: Espacio requerido	69
Tabla 43: Hoja de especificaciones Precalentador de aire	71
Tabla 44: Hoja de especificación Filtro de mangas	73
Tabla 45: Dimensiones tolva	76
Tabla 46: Características valvula rotativa	77
Tabla 47: Resultados de emisión muestreados	78
Tabla 48: Tiempo actuación válvula rotativa	78
Tabla 49: Factores de capacidad de tornillos sin fin	79
Tabla 50: Resultados diseño tornillo sin-fin	80
Tabla 51: Tipos de elevadores de cangilones	81
Tabla 52: Características de diseño elevador de cangilones	82
Tabla 53: Diseño tolva silo	83
Tabla 54: Factores para la velocidad de filtración en sistemas Pulse-Jet	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Materias Primas, productos y subproductos en la industria del sector oleícola	2
Figura 2: Almacenamiento del orujillo	3
Figura 3: Balance neutro de carbono [2]	3
Figura 4: Molino de rodillos más laminadora	7
Figura 5: Prensa Expeller	8
Figura 6: Diagrama de proceso extracción de aceite de girasol	9
Figura 7: Secadero rotativo	10
Figura 8: Granuladora de orujo	10
Figura 9: Extractor de aceite	11
Figura 10: Condensador de vapores	12
Figura 11: Diagrama de proceso de extracción de aceite de orujo	13
Figura 12: Diagrama de procesos sector PIG7	16
Figura 13: Torre de relleno	18
Figura 14: Separador ciclónico [6]	19
Figura 15: Filtro de mangas [9]	20
Figura 16: Precipitador electrostático [11]	21
Figura 17: Comparativa rango de aplicación de equipos de depuración de humos [5]	24
Figura 18: Evolución mensual de la temperatura salida del ciclón	25
Figura 19: Evolución mensual de la temperatura salida de caldera	25
Figura 20: Diferentes geometrías aerorefrigeradores [13]	26
Figura 21: Precalentador tubular de acero	27
Figura 22: Precalentador de chapas	27
Figura 23: Precalentador regenerativo Ljungstrom	27
Figura 24: Precalentador Rothermuhle	28
Figura 25: Situación 1	29
Figura 26: Situación 2	30
Figura 27: Especificaciones distintas corrientes del sistema.	34
Figura 28: Diagrama de proceso línea de estudio	36
Figura 29: Ciclón FC-101	37
Figura 30: Precalentador de aire	41
Figura 31: Gráfico NTU para intercambiadores de placas	42
Figura 32: Disposición de fluidos	43
Figura 33: Configuración de tubos a tres bolillos	48
Figura 34: Relación Area-Número de celdas [21].	50
Figura 35: Disposición mangas filtrantes	51
Figura 36: Características mangas filtrantes [8]	51

Figura 37: Rango de los parámetros de diseño	55
Figura 38: Dimensiones precipitador electrostático	55
Figura 39: Costes estimados intercambiadores de calor [26]	57
Figura 40: Coste Aerorefrigerador [27]	59
Figura 41: Coste mangas filtrantes	61
Figura 42: Dimensiones tolva [30]	74
Figura 43: Características diferentes productos-diseño de tolvas	75
Figura 44: Ángulos de diseño tolva troncopiramidal	75
Figura 45: Válvula rotativa [31]	77
Figura 46: Curvas de velocidad-capacidad materiales clase C	79
Figura 47: Datos elevadores de descarga por gravedad	81
Figura 48: Dimensionado silo	83
Figura 49: Diagrama de procesos completo	84
Figura 50: Catálogo placas	86
Figura 51: Modelos Aerorefrigeradores	86
Figura 52: Velocidad de migración en diferentes industrias	88

1 ANTECEDENTES

El presente Trabajo Fin de Grado surge de la necesidad de una empresa agroalimentaria situada en la provincia de Sevilla, dedicada principalmente a la extracción de aceite de orujo, a reducir sus emisiones de partículas provocadas por la combustión de orujillo con objeto de cumplir la legislación vigente en materia medioambiental. Se trata de una empresa con una gran experiencia dentro del sector orujero contando con más de 100 años de historia.

En relación a este aspecto, la preocupación en el sector orujero es generalizada, debido a las fuertes imposiciones legislativas en cuanto a la reducción de emisión de partículas que se están implantando se teme por el cierre de muchas industrias, lo que supondría un grave problema en el sector del olivar, ya que las extractoras de orujo son las encargadas de procesar el 80% de los residuos que se extraen de la aceituna procedentes de las almazaras, por lo que representan un papel fundamental en el sector oleícola.

Se ha de explicar que para la empresa donde se realiza el estudio no solo se ven afectados por la pronta necesidad de reducir su nivel de concentración de partículas, sino que además en el municipio existe una cierta oposición de parte de la población a que continúe su explotación, a pesar de tratarse de ser una empresa con una larga historia. Por todo ello para evitar posibles noticias entorno a la instalación, la empresa prefiere ocultar su imagen e identidad.

2 INTRODUCCIÓN

2.1. Extractoras dentro del marco general del sector oleícola

En el presente texto se realiza una breve descripción del procesado de la aceituna desde su recolección hasta la obtención de los diferentes aceites generados y productos principales que surgen a partir de ella con objeto de definir y localizar la actividad de las extractoras de orujo dentro del marco general del sector oleícola.

Para ello se muestra un diagrama esquemático representativo del procesado global de la aceituna.

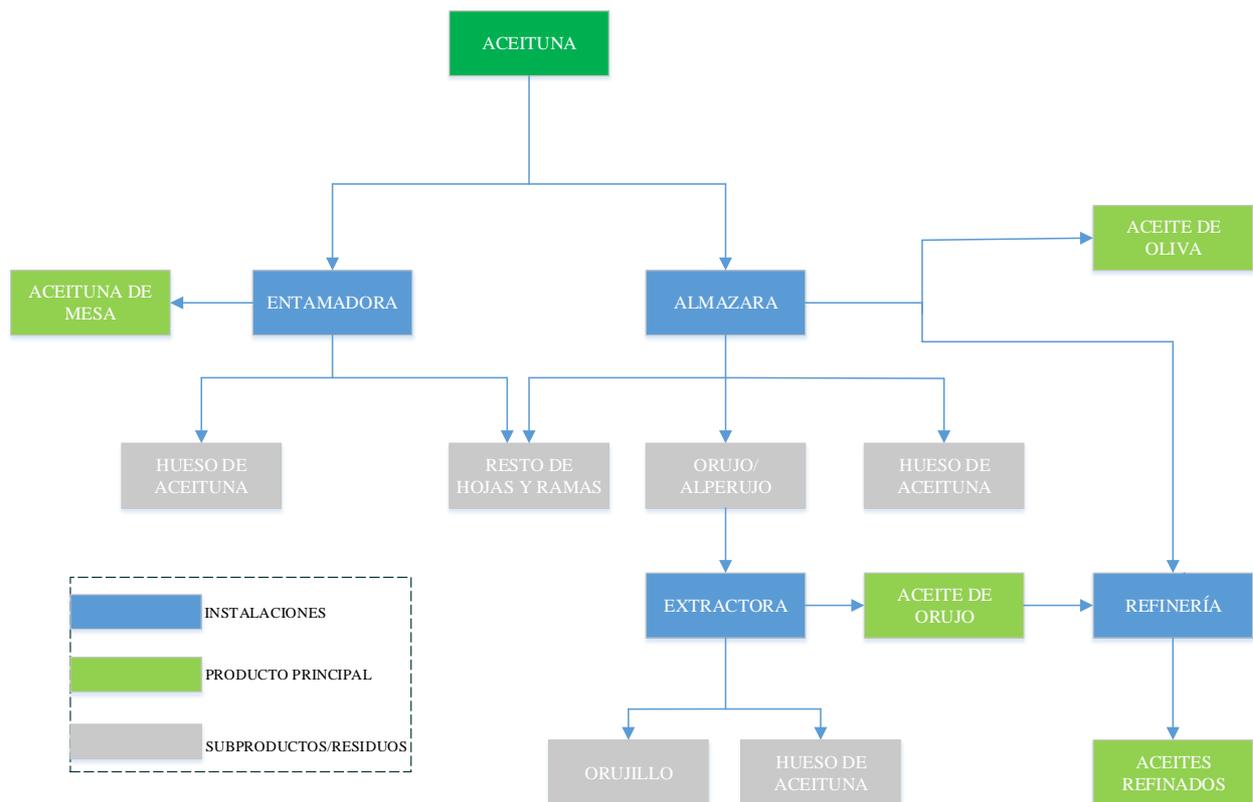


Figura 1: Materias Primas, productos y subproductos en la industria del sector oleícola

Cómo se puede ver en la figura anterior existen cuatro principales industrias dentro del sector del olivar para el procesado y obtención de los productos principales que se describen brevemente a continuación [1].

- Entamadora: En esta industria se realiza el aderezo y tratamiento de muchas variedades y tipologías de aceitunas para que puedan ser consumidas. Una vez realizado su tratamiento se procede al envasado para su posterior venta. En algunas ocasiones las entamadoras pueden formar parte de la propia almazara [3].
- Almazara: Corresponde a la industria dónde se realiza la transformación de la aceituna para obtener el aceite de oliva. En estas instalaciones no se utilizan procesos químicos para la obtención del aceite, sino a través de medios mecánicos y procesos físicos. Como en toda actividad industrial se generan una serie de residuos y subproductos, y concretamente el orujo se destina a la extractora dónde se realiza la última etapa de extracción con el propósito de aumentar el rendimiento de extracción de aceite. Además, para las almazaras supone un gran beneficio el hecho de que las extractoras de orujo se encargen de su principal residuo como es el orujo.
- Extractora: En esta instalación a partir del orujo graso húmedo (alpeorujo) generado en las almazaras y realizando tratamientos químicos mediante extracción con hexano se obtiene el aceite conocido como

aceite de orujo de oliva que posteriormente se destina a la instalación de refinado para su consumo final. Es la industria encargada de procesar el 80 % de los residuos que se extraen de la aceituna, por lo que constituyen un papel fundamental en el sector oleícola. El aceite de orujo es necesario refinarlo en las refinerías de aceite con objeto de adecuarlo para la venta y el consumo humano.

- Refinería: En esta industria se produce el refinado de aceites de orujo y aceites de oliva conocidos como lampantes, ya que son aceites cuyas características (acidez, aroma, sabor, color) no son aptas para el consumo humano, y requieren de procesos y tratamientos físico-químicos para adecuarlos a las especificaciones de consumo.

Por lo tanto, las extractoras de orujo constituyen el último eslabón dentro del proceso productivo del sector oleícola además de ser los encargados de la valorización del orujo graso húmedo generado en las almazaras.

2.2. Problemática medioambiental

En las plantas extractoras de orujo existen una serie de focos contaminantes, que en mayor o menor medida necesitan de un control apropiado para cada tipo de contaminante generado (sólido, líquido, gas) durante los diversos procesos llevados a cabo en la instalación industrial, si se emiten en valores superiores a valores límites marcados por la legislación.

La utilización de orujillo como combustible, principal subproducto generado en la extracción de aceite de orujo, trae consigo importantes ventajas medioambientales, ya que además de evitar los problemas medioambientales causados por el almacenamiento y eliminación del orujillo, la reutilización de este subproducto reduce la dependencia energética de otros combustibles fósiles.



Figura 2: Almacenamiento del orujillo

Por otro lado, cuando se produce la quema de orujillo en la caldera de vapor se libera CO_2 a la atmósfera, pero dicho CO_2 es utilizado por árboles y materia vegetal, que al ser uno de los principales sumideros de carbono naturales, absorben el carbono de la atmósfera para convertirlo en madera, hojas o fruto, por lo que al quemarlo se devuelve a la atmósfera, cerrando el ciclo y manteniendo constante el nivel de emisión de CO_2 a la atmósfera.



Figura 3: Balance neutro de carbono [2]

A todo lo comentado anteriormente hay que sumar una ventaja medioambiental más, y es la ausencia o el bajo

contenido de azufre presente en la composición del orujillo, hecho que impide la formación de la lluvia ácida, situación que ocasiona consecuencias muy negativas a la naturaleza.

A pesar de todas las ventajas medioambientales comentadas anteriormente existe un problema provocado por la combustión de este subproducto en la caldera de vapor y es el exceso de partículas generadas que salen junto a los gases de combustión por chimenea. Además, el otro principal contaminante generado es el CO.

Haciendo referencia a las últimas inspecciones realizadas por ATISAE en la planta extractora se puede observar en la siguiente tabla los resultados obtenidos en comparación a los valores límites de emisión establecidos en la normativa aplicable:

PIG7-CALDERA DE VAPOR						
CONTAMIN.	MEDIDAS	VALORES OBTENIDOS			VALORES LÍMITE	SUPERA SI/NO
		Concentración	Incertidumbre	Concentración Incertidumbre		
Partículas	Medida 1	989	80	909	400 mg/Nm ³	SI
	Medida 2	1054	80	974		
	Medida 3	1687	80	1607		
	MEDIA			1163		
CO	Medida 1	1218	73,1	1145	1445 p.p.m.	NO
	Medida 2	1102	66,1	1036		
	Medida 3	808	48,5	759		
	MEDIA			980		

Tabla 1: Mediciones contaminantes

Las emisiones de partículas por chimenea superan los límites de emisión establecidos por la legislación vigente, hecho que genera la inactividad de los secaderos de la instalación debido a que no se pueden aprovechar los gases de combustión en la etapa de secado debido a la alta concentración de polvo en el interior del secadero, que genera niveles de atmósfera bastantes peligrosos, por lo que tienen que recurrir a empresas externas para que realicen el secado dejando inoperativo el secadero.

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

Este proyecto persigue fundamentalmente el siguiente objetivo principal:

- Seleccionar y realizar el diseño a escala de ingeniería básica de la alternativa de control de partículas más adecuada para cumplir con la legislación en materia medioambiental en una instalación de producción de aceite de orujo.

Para ello se tendrán en cuenta criterios tanto de rendimiento de captura, eficiencia energética, impacto ambiental y aprovechamiento de residuos y recursos.

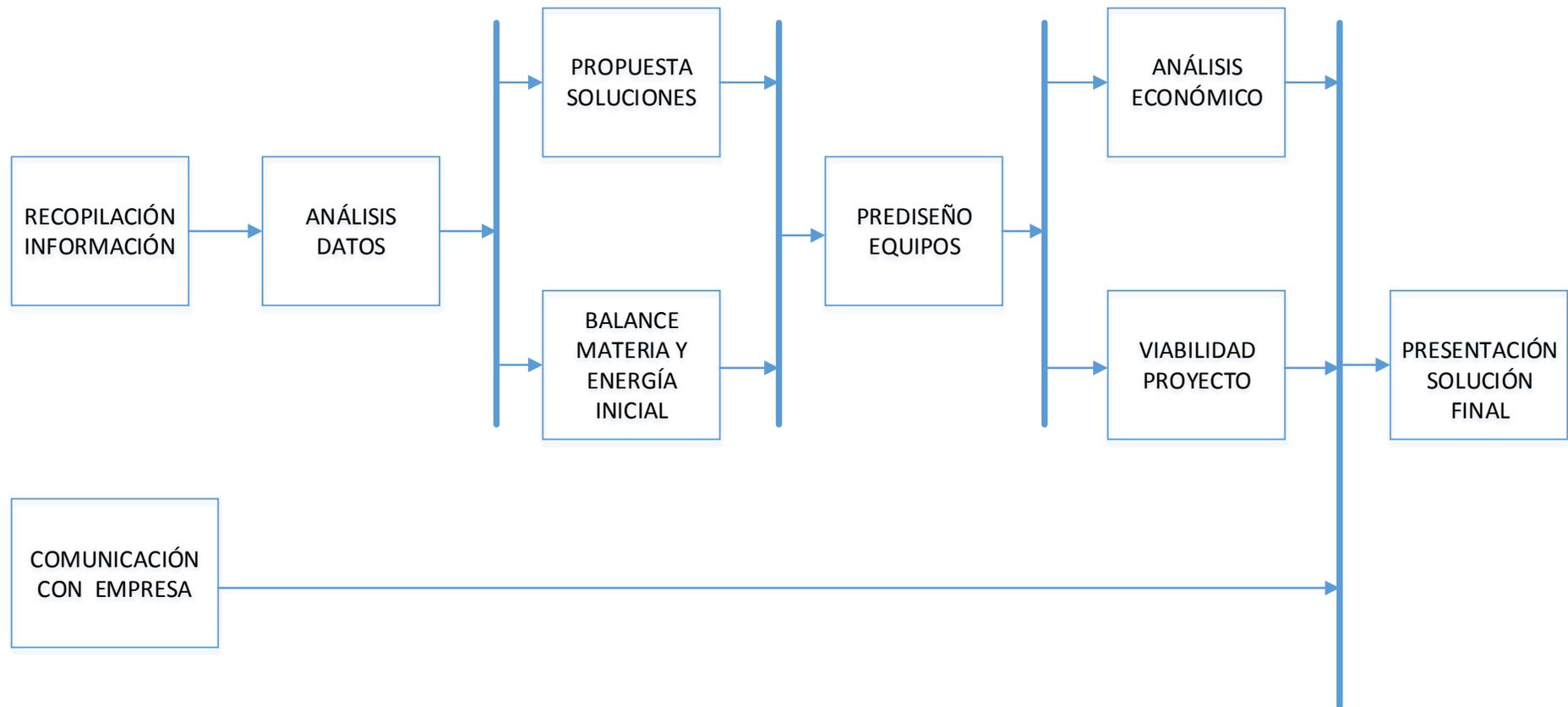
Para ello, hay que cumplir una serie de objetivo específicos:

- Selección y justificación de las posibles alternativas.
- Diseño de equipos.
- Realizar un análisis económico de las diferentes soluciones propuestas.

El alcance del Proyecto comprende:

- El estudio se centra en las emisiones procedentes del foco de emisión de la planta objeto de estudio consistentes en los gases de escape de la caldera de vapor, por lo que no se evalúan otros puntos de emisión de la planta como son los secaderos 5 y 6.
- La resolución de los balances de materia y de energía necesarios para el análisis del foco.
- Propuesta de alternativas técnicas para el control de las emisiones de partículas.
- Análisis de alternativas y selección del tratamiento técnico-económico más adecuado.
- Ingeniería básica de la instalación de la alternativa seleccionada incluyendo memoria de cálculo, hojas de especificaciones de equipos y presupuesto preliminar.

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO



5 MEMORIA DESCRIPTIVA

5.1 Descripción del proceso

La principal actividad que se desarrolla en la planta consiste en la extracción de aceite vegetal a partir de orujo graso seco y de semillas oleaginosas, fundamentalmente semillas de girasol.

A continuación, en los siguientes puntos se aborda la descripción de los procesos tecnológicos que se realizan en la planta de las dos principales actividades de la empresa dónde se profundiza en la secuenciación de etapas necesarias para obtener el producto final, además de presentar los diagramas de proceso correspondientes.

5.1.1 Extracción de aceite de semillas oleaginosas

Las semillas de girasol son descargadas en las naves de almacenamiento destinadas para tal fin, una vez pesada y realizadas las tomas de muestras necesarias para analizar la humedad, las impurezas y la riqueza en grasa, preparadas para su posterior entrada al secadero.

La semilla que haya necesitado secado se extrae en caliente, por lo que se introduce en la limpiadora para procesarla de inmediato y si no es posible, previo enfriamiento por ventilación natural se vuelve a almacenar. El proceso de limpieza de las semillas es importante ya que cuando llegan a la planta contienen impurezas o contaminantes como tierra, piedras o elementos metálicos que pueden originar problemas importantes en los equipos que componen la instalación [4].

Desde la tolva de alimentación de la limpiadora se eleva la semilla mediante transportador de cangilones a la propia limpiadora, que se encuentra sustentada sobre una estructura metálica de soporte. Desde ahí pasa la semilla, por gravedad, a los molinos trituradores de rodillos, y desde éstos, mediante tornillos sinfines, se alimentan las laminadoras, situadas en paralelo a los molinos.

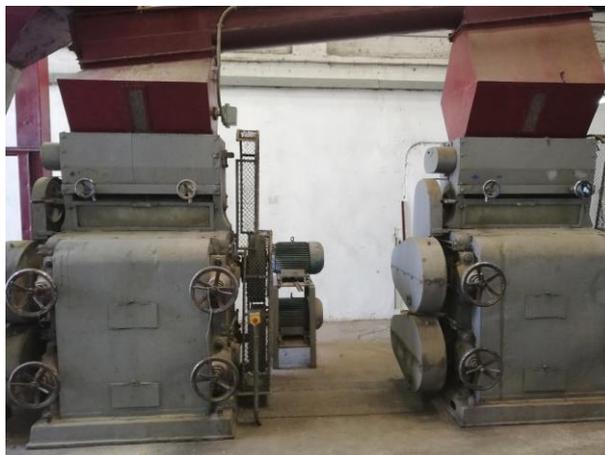


Figura 4: Molino de rodillos más laminadora

La semilla, triturada y laminada, se eleva, mediante transportador de hélice, de caja calefactada que favorece el proceso posterior de extracción [4], hasta una termobatidora situada en un tercer nivel, con posibilidad de retorno, en caso de sobrecarga de la termobatidora.

De la termobatidora, donde se adiciona vapor a la masa, pasa ésta por gravedad al acondicionador final, desde la que sale también por gravedad, a la prensa "Expeller", que se refrigera por agua para evitar el sobrecalentamiento de la torta.



Figura 5: Prensa Expeller

En la prensa el aceite o grasa fluye, a través de la camisa, hacia su parte inferior y es transportado a un decantador, los aceites pasan finalmente a filtración y los sólidos decantados se transportan a la entrada de la termobatidora, para ser acondicionados térmicamente de nuevo.

La torta que expulsa la prensa ya triturada y tras pasar por un proceso de secado, si es necesario, se transporta hasta las tolvas situadas en la parte superior de los extractores discontinuos. Aquí se inicia el proceso de extracción, tras el cual se obtienen aceites de semilla desolventizados y turtó de semilla desolventizado. Este es recogido a la salida de los extractores y transportado hasta un molino de martillos, para su disgregación y desde aquí pasa a la nave de granulación y envasado, o bien se almacena a granel en las naves destinadas a tal fin, siendo, en ocasiones, necesario un proceso de secado de estas harinas previo a su almacenamiento.

Los aceites procedentes del filtrado se trasiegan a los depósitos de almacenamiento, subterráneos o intemperie.

A continuación, se muestra el diagrama de procesos de la extracción de aceite de orujo a partir de semillas de girasol.

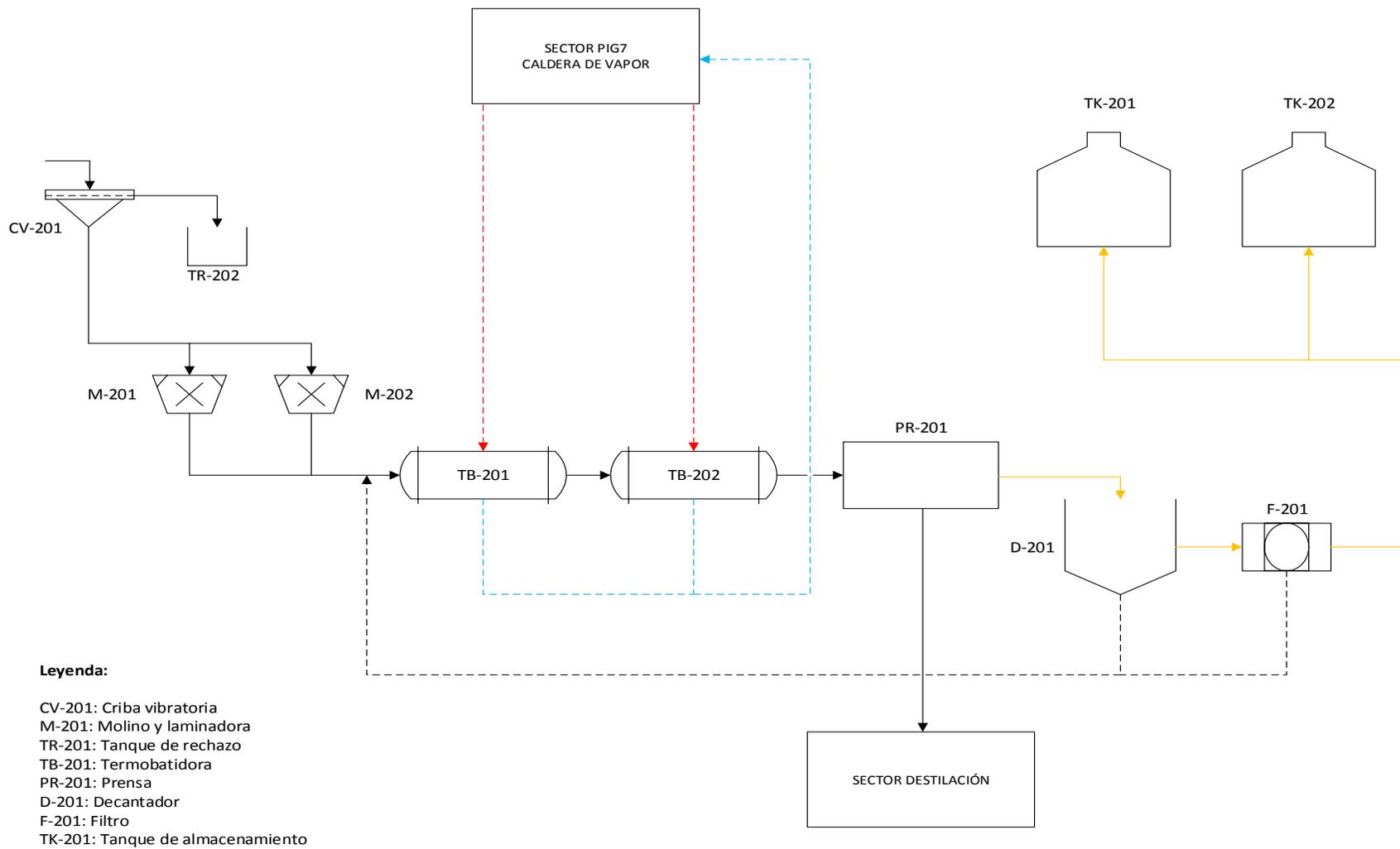


Figura 6: Diagrama de proceso extracción de aceite de girasol

5.1.2 Extracción de aceite de orujo de aceitunas

Tras la recepción y el almacenamiento del orujo, se debe proceder al secado del orujo, recibido con diferentes grados de humedad, según el método de extracción del aceite de oliva en la almazara de procedencia, alrededor del 25% en el caso del orujo procedente de las almazaras con sistema de extracción tradicional con prensas, 50 % en el orujo procedente de extracción continua con centrífuga en tres fases, y 60 - 70% en el orujo procedente de extracción continua con centrífuga en dos fases.

La humedad óptima de extracción es de un 7%, lo cual se consigue mediante el secado de éste en los secaderos rotativos tipo trommel de que dispone la planta, que constan de un horno de combustible sólido, donde se calienta el aire para el secado; de un cilindro rotativo, por el cual se hace pasar el orujo húmedo en isocorriente con un flujo de aire caliente, que es aspirado por un ventilador situado en salida del cilindro, previo paso por un sistema ciclónico de limpieza de gases. En la actualidad debido a la problemática medioambiental ocasionada por las emisiones de partículas, estos secaderos no están en funcionamiento, por lo que el secado del orujo imprescindible para los procesos posteriores es realizado por una empresa externa.



Figura 7: Secadero rotativo

Una vez alcanzado este 7% de humedad en el orujo, se procede a la separación de la pulpa y el hueso del mismo, a la granulación de la pulpa y a la posterior mezcla de la pulpa granulada y el hueso.



Figura 8: Granuladora de orujo

Tras el secado y acondicionamiento del orujo anteriormente descrito, se procede a la extracción del aceite contenido en el mismo, mediante un proceso de destilación discontinuo.

El proceso discontinuo de extracción de aceites con disolvente que se efectúa en la instalación es válido tanto para el orujo de aceitunas como para la torta de prensado de semillas oleaginosas, y consta, básicamente, de los siguientes elementos:

- Depósitos de hexano.
- Extractores.
- Destiladores.
- Condensadores.
- Captador de hexano mediante aceite.
- Tanques de desgomado.
- Elementos de transporte (sólidos, líquidos y vapores).
- Elementos de control y valvulería.

El proceso comienza con la introducción en el extractor del orujo de aceituna, o el turtó de semilla, hasta su carga. Una vez cerrado el mismo, se inicia la introducción de hexano y vapor de agua, comenzando el proceso de extracción durante el cual las miscelas pasan a los destiladores y el vapor de hexano y agua a los condensadores.



Figura 9: Extractor de aceite

Del destilador el aceite se trasiega hasta la instalación de desgomado y los vapores de hexano y agua se unen a los procedentes del extractor en los condensadores. El condensado de agua se separa del hexano en un decantador debido a la diferencia de densidad, volviendo el hexano al tanque de origen.



Figura 10: Condensador de vapores

Los vapores de hexano procedentes del depósito y del decantador se dirigen hasta el captador de hexano mediante aceite (proceso inverso), sufriendo de nuevo esas miscelas el proceso de destilación.

Una vez agotado el aceite que contiene el orujo o la semilla del extractor en cuestión, se da por terminado el proceso, se cierran todas las válvulas de admisión y salida y se procede a la apertura de la boca de descarga del extractor. Buena parte del orujo o la semilla extractada (torta extractada) sale del recipiente por la diferencia de presión con la atmosférica, siendo necesario, usualmente, desalojar el resto con la ayuda de palos o herramientas no férricas.

El producto extractado se muele y se destina a la elaboración de gránulos, harinas y/o piensos compuestos. Se trata de actividades secundarias llevadas a cabo en la planta, pero de gran importancia para la empresa ya que pueden dar salida a subproductos y residuos generados durante la extracción de aceites de orujo y semillas oleaginosas.

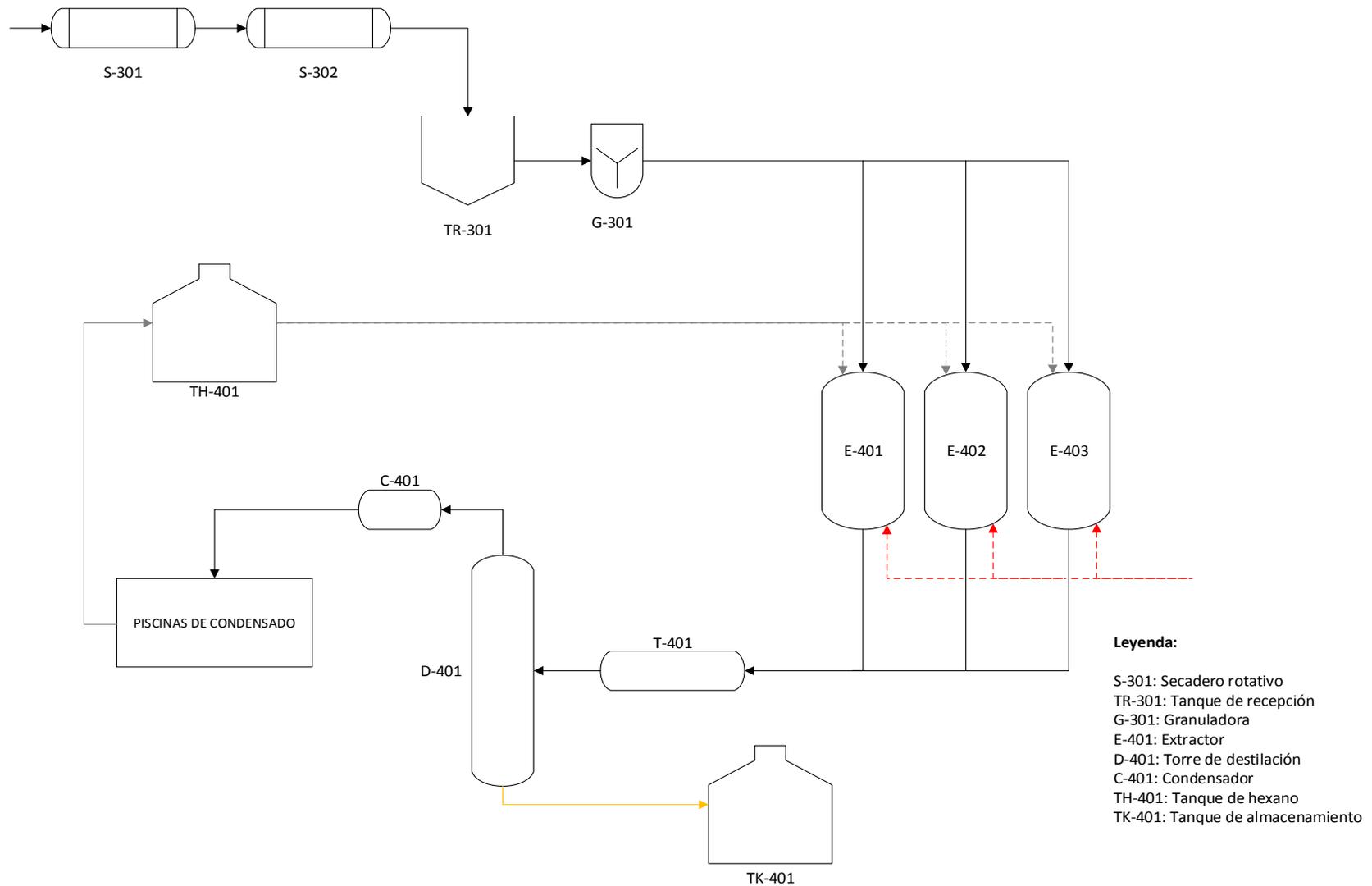


Figura 11: Diagrama de proceso de extracción de aceite de orujo

5.2. Bases de partida

En esta sección se pretende definir completamente la línea de estudio de este proyecto además de definir las bases de partida. El foco de análisis se centra fundamentalmente en las emisiones de partículas procedentes de la caldera de vapor, cuyas características técnicas principales aportadas por la empresa son las siguientes.

HOJA DE ESPECIFICACIÓN CALDERA DE VAPOR	
DATOS GENERALES	
Marca	Vaycora (El Ferrol)
Tipo	Acuotubular
Nomenclatura	R-101
Combustible	Orujillo
Función	Producción de vapor
DATOS DE DISEÑO	
Potencia Térmica Nominal (MWt)	3,6
Presión máxima (kg/cm ²)	11
Producción de vapor (kg/h)	6500
Rendimiento (%)	85
Volumen cámara de agua (m ³)	3,66
Volumen cámara de vapor (m ³)	2,67
Volumen total (m ³)	6,33
Superficie libre evaporación (m ²)	4,4

Tabla 2: Hoja de especificación caldera de vapor

En cuanto a la actividad de la empresa, es necesario definir número de días y horas de trabajo al año.

Número de días de trabajo al año	92
Número de horas de trabajo al día	24
Número de horas reales de producción al año	2208

Tabla 3: Horas de actividad

A continuación, en la Figura 12 se muestra el diagrama de procesos de la línea de estudio de la instalación. Actualmente, solo cuenta con un separador cíclico previo a la salida de los gases de combustión por chimenea como medida de mitigación de partículas, que por sí solo no basta para cumplir las restricciones ambientales legislativas.

De acuerdo con la Ecuación 1 en el que se compara el valor registrado durante las medidas con el valor límite de emisión, es necesario una eficacia mínima de captación del equipo de depuración (teniendo en cuenta el valor más restrictivo).

$$\eta_{min} = \frac{C_m - C_L}{C_m} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Dónde:

- C_m : Concentración de partículas medida
- C_L : Concentración límite de partículas establecido por la normativa.

En la situación actual, la eficacia requerida por el equipo de captación sería aproximadamente entorno a un 75%, pero debido a las futuras variaciones de la legislación previstas, en este estudio se va a considerar una eficacia de captación requerida tal que los niveles de emisiones de partículas sean inferiores a 20 mg/Nm³, por tanto, la eficacia de captación sería:

C_m (mg/Nm ³)	1607
C_L (mg/Nm ³)	20
η_{min} (%)	98,5

Tabla 4: Eficacia requerida

En la siguiente sección se procede a la identificación de las posibles alternativas existentes en la actualidad con objeto de seleccionar y discutir posteriormente las diferentes opciones que pueden considerarse válidas para cumplir con los objetivos pertinentes.

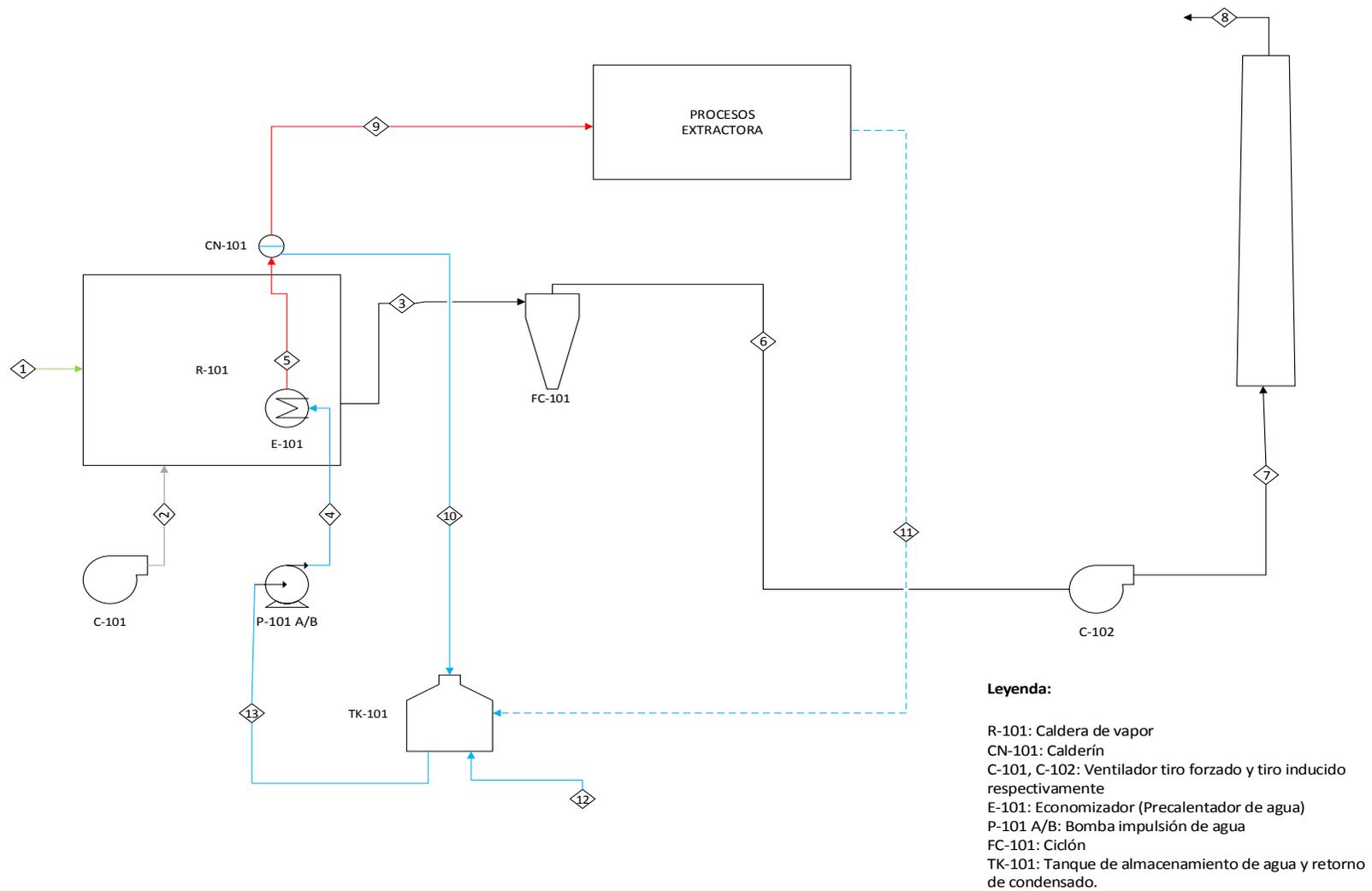


Figura 12: Diagrama de procesos sector PIG7

5.3. Identificación de alternativas

En este apartado se describen las distintas alternativas de control de partículas existentes en la actualidad con objeto de reducir la elevada concentración de estas y por consiguiente cumplir con la normativa aplicable.

Se pueden encontrar principalmente cuatro grandes grupos en cuanto a sistemas de captación de partículas se refiere, como son:

- Separadores húmedos.
- Separadores mecánicos.
- Filtros de mangas.
- Precipitadores electrostáticos.

5.3.1. Separadores húmedos

Los separadores húmedos o scrubbers utilizan un líquido, normalmente agua o una solución acuosa, con objeto de separar de la corriente gaseosa las partículas sólidas generándose un lodo que implica el posterior tratamiento antes de su vertido. Estos equipos pueden realizar una doble función, ya que son capaces de captar partículas además de separar gases contaminantes como el SO₂, HCl, HF...

Este tipo de tecnología tiene gran aplicación cuando:

- Los gases a depurar requieren tratamiento simultáneo de absorción de gases contaminantes y captación de partículas.
- Los sólidos particulados presentan riesgo de fuego o explosión debido a su naturaleza inflamable.
- Se requiere una elevada eficacia de captación.

Sin embargo, presenta una serie de desventajas como:

- Altos costes de operación debido a la cantidad de agua necesaria para el tratamiento.
- Necesidad de disponer de una planta de tratamiento de lodos.

Existe una gran diversidad de colectores por vía húmeda entre los que destacan principalmente:

- Torres de pulverización: Son equipos de captación de baja pérdida de carga, cuyo principio de funcionamiento es muy simple. El equipo cuenta con unas boquillas atomizadoras que rocían el agua pulverizada sobre la corriente de gases de combustión, de forma que las gotas arrastran las partículas presentes en humos. Existen varias configuraciones posibles (torres verticales u horizontales) dónde la circulación de los fluidos puede ser en contracorriente o cruzada.
- Torres de relleno: Se trata de un equipo que consta de una carcasa cilíndrica en cuyo interior se deposita el relleno fijado sobre un soporte de parrilla. El relleno proporciona una gran superficie de intercambio, lo que favorece la colección de partículas. La configuración de los fluidos suele ser en isocorriente con objeto de favorecer la autolimpieza del relleno interior.

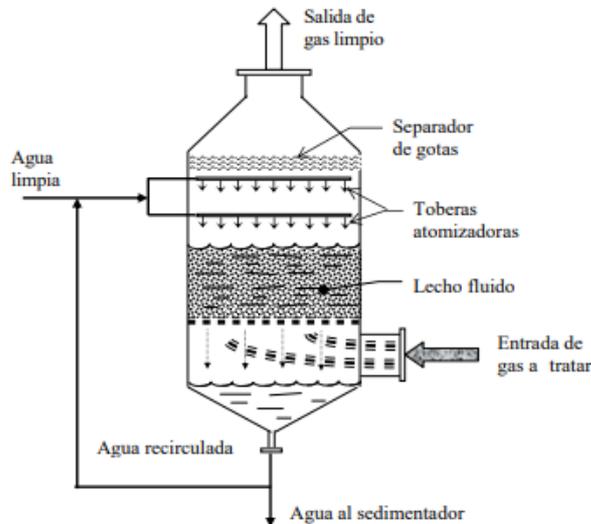


Figura 13: Torre de relleno

- Lavadores tipo Venturi: Este equipo presenta un estrechamiento brusco de la sección por dónde circula la corriente de gases a tratar, donde se inyecta el líquido. Debido a que en la garganta el gas alcanza una gran velocidad provoca la atomización del líquido, generalmente agua. Aguas abajo del Venturi es necesario disponer de un hidrociclón que permita separar el agua cargado de partículas del gas limpio.

La selección del tipo de separador húmedo dependerá de la pérdida de carga permitida, de las características de los contaminantes, así como de la eficacia de captación requerida.

5.3.2. Separadores mecánicos

El principio de funcionamiento de los separadores mecánicos se basa en las distintas fuerzas que actúan sobre las partículas sólidas para separarlas de la corriente gaseosa, suelen ser fuerzas gravitatorias, centrífugas e inerciales. Generalmente los separadores mecánicos presentan bajas eficacias de captación para partículas de pocas micras, por lo que se emplean como separadores previos al equipo de alta eficacia.

Dentro de este grupo de separadores se encuentran diferentes tipos como son:

- Cámaras de gravedad: Cámaras de gran tamaño donde se produce una expansión de sección y como consecuencia una reducción de velocidad de la corriente gaseosa que provoca la sedimentación de las partículas por acción de la gravedad. Destacan principalmente por su baja pérdida de carga y por sus bajos costes de inversión y mantenimiento, pero son equipos de gran volumen cuya eficacia es muy baja para partículas inferiores a 40 micras [6].
- Separadores inerciales: Estos equipos son similares a las cámaras de gravedad, pero con la presencia de una serie de placas deflectoras interiores, de tal manera que las partículas arrastradas por el gas chocan con las placas cayendo al fondo, lo que permite alcanzar una mayor eficacia de captación, pero en detrimento de una mayor pérdida de carga.
- Separadores ciclónicos: Son equipos que por medio de la fuerza centrífuga generada hacen girar una corriente de gas con el fin de separar las partículas del gas que las transporta. La fuerza centrífuga provoca que las partículas impacten contra las paredes externas del ciclón y caigan al fondo, mientras que el gas limpio sale por la parte central. Son equipos sencillos que pueden trabajar en continuo y presenta generalmente bajos costes de operación e inversión, sin embargo, en el caso que las partículas arrastradas por el gas sean de pequeño tamaño la eficacia disminuye considerablemente [6].

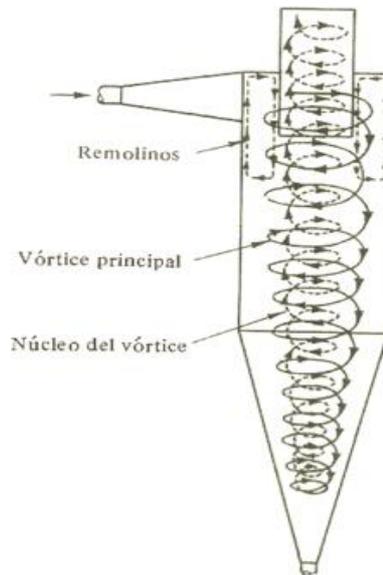


Figura 14: Separador ciclónico [6]

5.3.3. Filtros de mangas

La unidad del filtro de mangas consiste en uno o más compartimientos aislados que contienen filas de mangas de tejido. El flujo de gas sucio viaja en dirección perpendicular a la superficie del medio filtrante, por lo que las partículas son retenidas en el mismo, y solo atraviesa la tela el aire limpio que es liberado a la atmósfera.

El filtro se opera cíclicamente en el que se alternan períodos relativamente largos de filtración y cortos de limpieza. El filtro se va cargando de partículas (interior o exteriormente) durante la etapa de filtración y la pérdida de carga va aumentando hasta un determinado momento, en el que se procede a la etapa de limpieza del filtro con el objeto de comenzar un nuevo ciclo de filtración. Los valores típicos de caída de presión se encuentran en el rango de aproximadamente 1,25 a 5 kPa [7].

El fundamento del efecto filtrante reside principalmente en la capa de polvo (torta) que se va acumulando sobre el tejido que, a su vez, este también realiza un cierto efecto filtrante pero su principal misión consiste en servir de soporte para la torta de polvo que se va generando.

La principal diferencia existente en los filtros es el mecanismo de limpieza empleado para las mangas, característica que condiciona que el proceso de filtración sea continuo o discontinuo. Conforme los poros del medio filtrante se van cargando de partículas la eficacia de captación va aumentando, sin embargo, llega un momento en el que la pérdida de carga es suficientemente grande como para proceder a la limpieza del mismo, esta puede hacerse de forma intermitente y principalmente existen tres tipos de limpieza [21]:

- **Agitación mecánica:** Este método de limpieza exige un funcionamiento discontinuo con un ciclo de filtración y otro de limpieza, por lo que cuando la filtración es continua es necesario disponer de otro módulo adicional o el proceso de filtración tiene que ser detenido. El movimiento de agitación puede ser provocado de diferentes formas por medio de sistemas de vibración o sacudidas con el propósito de crear una onda sinusoidal a lo largo de la manga que provoca el desprendimiento de las partículas retenidas.
- **Aire en contracorriente:** Este método de limpieza también requiere un funcionamiento discontinuo, durante la etapa de limpieza se dirige un flujo de aire en contracorriente por medio de un ventilador que fuerza el flujo, de fuera hacia dentro provocando la separación de la torta.
- **Aire a presión:** Mediante un chorro de aire a alta presión durante un corto periodo de tiempo provocando el desprendimiento de la capa de partículas de las mangas, método efectivo controlado y regulado por un programador automático. Debido a que el tiempo de limpieza es muy corto, y se limpia sólo una fracción de las mangas cada vez, se mantiene un flujo continuo a través del filtro de mangas.

Los filtros de mangas son unidades de depuración cuyas principales ventajas son las siguientes [8]:

- Pérdidas de carga relativamente bajas.
- Alta eficacia, incluso para partículas muy pequeñas.
- Las partículas generadas se recogen secas en la tolva de recolección facilitando su eliminación o reprocesamiento final.
- No es selectivo, ya que permite operar con gran variedad de tipos de polvo.
- Baja sensibilidad a variaciones en la carga de partículas.
- Diseño modular con capacidad para operar en gran rango de caudales de gas.

Pero también presenta una serie de limitaciones como:

- Temperatura. Para valores de temperatura superiores a 275°C es necesario disponer de tejidos especiales de material refractario o metálico, aún en estado de desarrollo.
- Colmatación. La condensación de humedad o deposición de algunas partículas como alquitrán pueden ocasionar la colmatación del filtro.
- La vida útil del tejido puede ser demasiado corta cuando el polvo o el gas son fuertemente alcalinos o ácidos y si la temperatura de operación es más elevada que la temperatura de diseño de las mangas.
- Necesidad de espacio para su implantación.
- Concentraciones superiores a 50 g/cm³ de polvo fácilmente oxidable suponen un peligro de incendio o explosión.

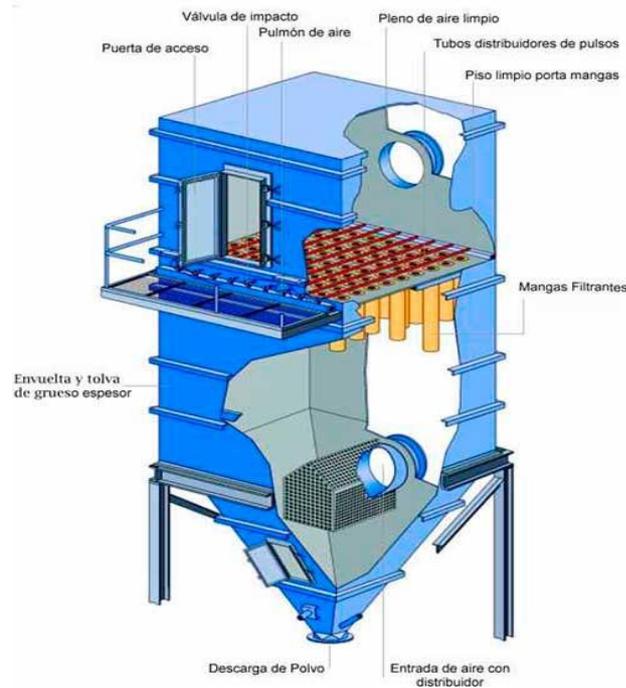


Figura 15: Filtro de mangas [9]

5.3.4. Precipitador electrostático (PES)

El fenómeno de ionización es la base del funcionamiento de un PES, es decir, las partículas que pasan a través de las placas se ven afectadas por un campo eléctrico, lo que hace que estas se carguen eléctricamente. Los gases pasan por el interior de una cámara, lugar donde se crea el campo electrostático formado por electrodos de descarga (negativo) y electrodos colectores (positivo); ambos electrodos suelen ser de placas de cobre. Cuando pasa el gas por las placas, este se carga negativamente debido al principio de ionización, y es atraído a los electrodos colectores debido a su diferente carga eléctrica [10].

Los precipitadores electrostáticos presentan una serie de ventajas como son las siguientes [8]:

- Alta eficacia fraccional para partículas de pequeño tamaño.
- Muy altos rendimientos de depuración (superiores al 99%).
- Capacidad de tratamiento para volúmenes de gases muy grandes, produciendo muy bajas pérdidas de carga (10-20 mm.c.a.).
- Capacidad para recogida del sólido depurado tanto por vía seca como húmeda.
- Posibilidad de ser diseñados para un amplio rango de temperaturas de operación.
- Costes de operación menores (salvo casos de muy alta eficiencia).

Además, presentan una serie de inconvenientes como:

- Alto coste de inversión, especialmente para bajos caudales.
- Muy poca flexibilidad, una vez instalados, ante ciertos cambios en las condiciones de operación (humedad, composición y temperatura del gas, naturaleza de los sólidos).
- Equipos de grandes dimensiones, con altas necesidades de espacio para su implantación.
- Limitaciones de funcionamiento cuando operan con sólidos de muy alta resistividad.

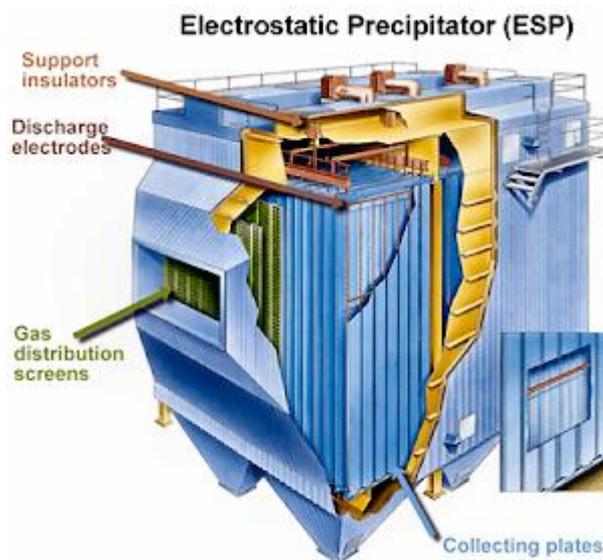


Figura 16: Precipitador electrostático [11]

5.4. Propuesta de alternativas para el control de partículas

Para la elección correcta de un equipo captador de partículas es necesario tener en cuenta varios factores determinantes dependientes tanto de las características del contaminante como la distribución del tamaño de partículas, de la corriente de gases de combustión como la concentración de partículas, el caudal, temperatura, humedad o de factores económicos como costes de inversión, operación, etc...

Por lo tanto, con objeto de englobar los diferentes factores principales que limitan la selección de las distintas alternativas se ha realizado una tabla dónde se recogen las características y parámetros principales. Cada una de estas características aparece ligado a un factor ponderado, que se ha otorgado en función de la mayor o menor importancia considerada.

En primer lugar, para realizar esta ponderación se ha atendido a tres criterios fundamentales, clasificados por orden decreciente de importancia, como son los siguientes:

1. Capacidad de satisfacer la eficacia requerida.
2. Factores económicos, y más concretamente costes de inversión, ya que se trata de una restricción muy importante siempre presente por la empresa.
3. Parámetros operativos y otros: consumo de agua, continuidad durante ciclo de limpieza, flexibilidad operativa...

En segundo lugar, se debe explicar los criterios seguidos para entender los valores asignados a cada una de las 4 alternativas estudiadas. Por ello hay que evaluar principalmente dos vertientes:

- Aquellos parámetros que se evalúen únicamente como 0 o 1. En estos casos aquellos equipos que aparezcan con un valor de 0 en su columna representa que la característica en cuestión no la cumple o es inherentemente negativa y por tanto, se contabiliza como 0 en el sumatorio de los diferentes parámetros estudiados. De tal forma que si el valor es 1 se contabiliza como el coeficiente ponderado en la suma total.
- Aquellos parámetros evaluados teniendo en cuenta tres opciones (-1,0,1). En estos casos la única diferencia significativa es la aparición del factor -1, que provoca la resta del coeficiente ponderado en aquellos equipos que contengan dicho valor, ya que se considera como la opción más negativa dentro de la comparativa. Respecto al factor 0 y 1 el criterio es el mismo que en el apartado anterior.

Finalmente, en el caso de que algún equipo no cumpla la característica principal, que es la capacidad de satisfacer la eficacia requerida, este de forma drástica se elimina como posible alternativa para el posterior dimensionado y análisis económico, apareciendo con el factor de color rojo.

A continuación, se muestra la tabla una vez definidos todos los criterios principales para la realización de esta.

	COEFICIENTE PONDERADO	SEPARADOR MECÁNICO	SEPARADOR HÚMEDO	FILTRO DE MANGAS	PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO
EFICIENCIA REQUERIDA (NO:0; SI:1)	10	0	0	1	1
CONTINUIDAD DURANTE CICLO LIMPIEZA (NO:0; SI:1)	5	0	1	1	1
CONSUMO DE AGUA (SI:0; NO:1)	5	1	0	1	1
PROBLEMÁTICA RESIDUOS GENERADOS (MAYOR:0; MENOR:1)	5	1	0	1	1
INVERSIÓN REQUERIDA (ALTO: -1; MEDIO:0; BAJO:1)	7	1	-1	0	0
COSTES OPERACIÓN (ALTO: -1; MEDIO:0; BAJO:1)	3	1	-1	-1	0
FLEXIBILIDAD OPERATIVA (NO:0; SI:1)	3	0	1	1	0
TOTAL		20	-2	25	25

Tabla 5: Comparativa distintas alternativas equipos de captación

Como se ha desarrollado en la sección anterior, el equipo de mitigación de partículas debe superar una eficacia de captación superior al 98,5 %.

De acuerdo a este requisito técnico que debe cumplir el equipo de captación, se puede rechazar la posibilidad de separadores mecánicos como alternativa para el control de partículas ya que como se explicó anteriormente estos equipos no alcanzan eficacias de captación tan elevadas ya que su principal función es la de servir como pretratamiento para eliminar las partículas más gruesas. Además, la instalación actual cuenta con un ciclón previo a la chimenea y aun así la carga contaminante emitida por humos es muy elevada, este hecho puede estar relacionado con el tamaño de las partículas sólidas emitidas por chimenea, ya que, aunque no se tengan análisis de estas partículas se puede intuir que el tamaño es muy pequeño, del orden de micras o inferior.

A continuación, se puede observar una distribución aproximada de la aplicación de los distintos tipos de tecnologías disponibles para el control del material particulado representadas en función del tamaño de partícula.

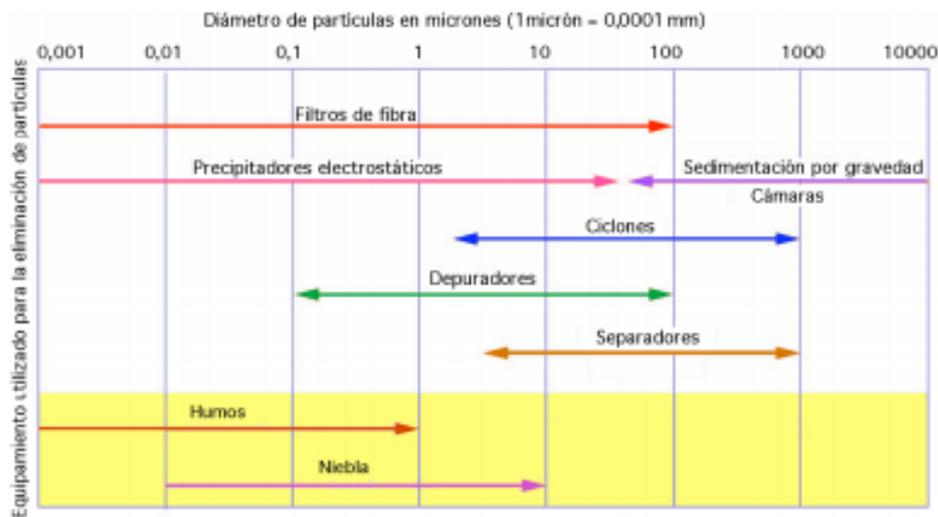


Figura 17: Comparativa rango de aplicación de equipos de depuración de humos [5]

En cuanto a los separadores húmedos, se rechaza dicha posibilidad debido a que no cumple la eficacia de captación necesaria en primer lugar, además de como se puede observar en la tabla aparecen muchos factores perjudiciales para su instalación como son principalmente los altos requerimientos operativos además de los costes de inversión y operación necesarios, ya que sería necesario disponer de una planta de tratamiento de agua dentro de la propia instalación lo que imposibilita esta opción.

Finalmente, como se puede observar en la Tabla 5, tanto el precipitador electrostático como el filtro de mangas son las alternativas que presentan la mayor ponderación (25) de las distintas alternativas, por lo tanto, en secciones posteriores se procede a realizar un estudio más detallado evaluando criterios de diseño y análisis económico para seleccionar aquel equipo que mejores prestaciones presente.

Una vez seleccionadas las alternativas más adecuadas es necesario tener en cuenta otro factor importante como es la alta temperatura de los gases de combustión ya que afecta directamente al correcto y eficaz funcionamiento del sistema de captación elegido, además de que existe la posibilidad del aprovechamiento energético de esta corriente con objeto de abaratar los equipos ya que el caudal de gases a tratar es menor y permite aumentar la eficiencia energética de la instalación.

Se han realizado varios gráficos que se muestran a continuación dónde se registran los valores de temperatura medidos por el sensor a la salida de caldera y por un termopar localizado justamente a la salida del ciclón.

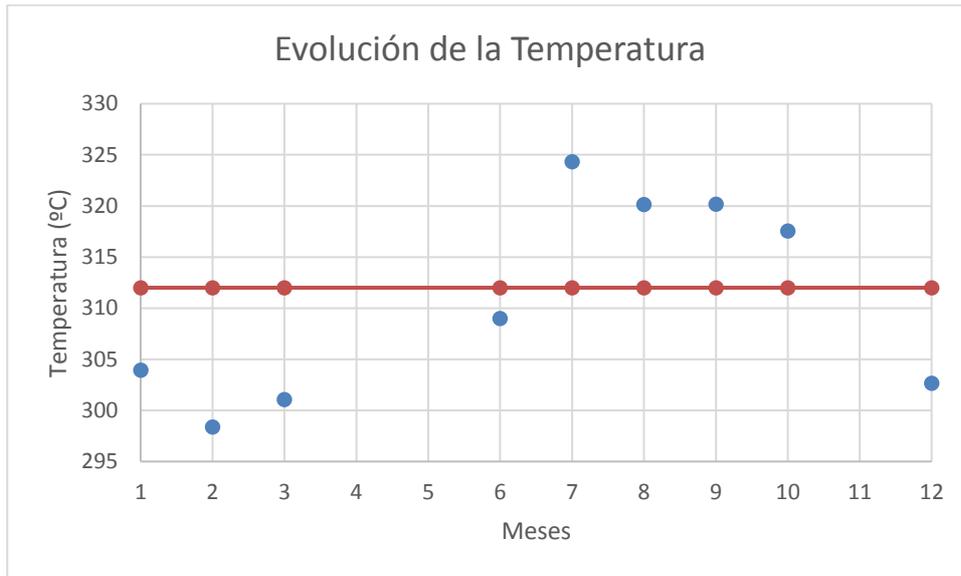


Figura 18: Evolución mensual de la temperatura salida del ciclón

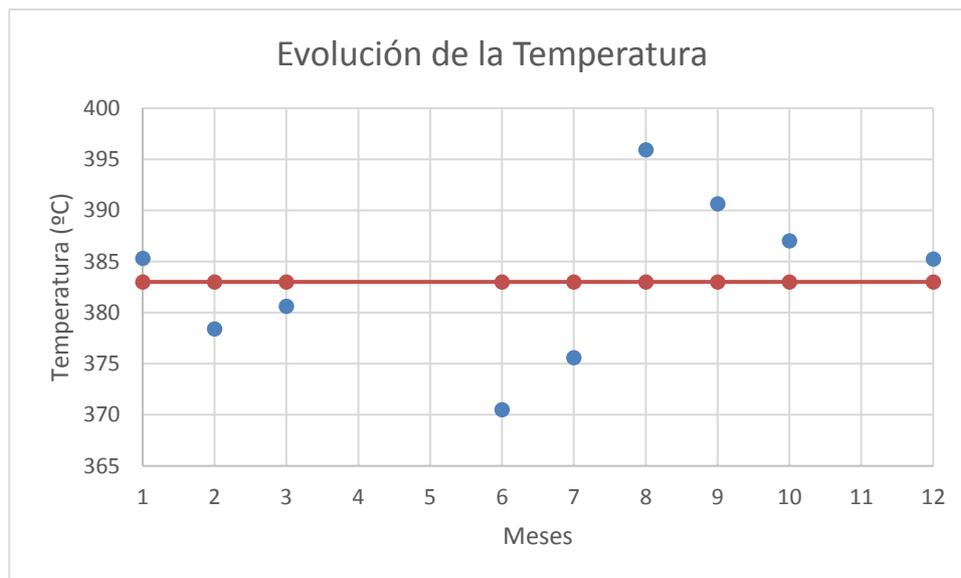


Figura 19: Evolución mensual de la temperatura salida de caldera

Como se puede observar en la Figura 18 la temperatura de los gases de combustión está entorno a los 311 °C de media, presentando picos de temperatura de 350 °C en los meses de trabajo más cálidos, por lo que debido a la elevada temperatura en humos es necesario de un equipo que sea capaz de disminuir esa temperatura considerablemente con el propósito que el equipo de captación de partículas trabaje de forma óptima y no provoque problemas asociados al funcionamiento normal o degradación de materiales. Concretamente los filtros de mangas cuya principal limitación es la temperatura que soportan sus mangas filtrantes, debido a que a partir de cierta temperatura la manga empieza a degradarse y su vida útil disminuye considerablemente.

Por lo tanto, es necesario enfriar considerablemente la temperatura de los gases de combustión. Para ello, se proponen dos posibles alternativas:

5.4.1. Aerorefrigerador

Los aerorefrigeradores son equipos utilizados industrialmente para enfriar un fluido o bien condensarlo, por lo tanto constituyen fundamentalmente intercambiadores de flujo cruzado formados por una serie de baterías que contienen tubos en su interior por donde circula el fluido de proceso. Así, el fluido que circula por los tubos que se encuentra a mayor temperatura que el aire ambiente, cede calor al aire ambiente reduciéndose su temperatura. Además, los aerorefrigeradores contienen una serie de ventiladores con objeto de forzar una corriente de aire hacia el haz de tubos para maximizar el intercambio de calor entre ambos fluidos. Estos equipos pueden presentar diferencias desde el punto de vista geométrico ya que normalmente se encuentran aerorefrigeradores horizontales o en forma de V.

Actualmente la presencia de aerorefrigeradores adiabáticos está aumentando en detrimento de los sistemas convencionales debido a que se consigue una mejora en la transferencia de calor, lo que permite operar a una potencia dada con menor caudal de aire, lo que genera un menor impacto sonoro además de un menor consumo energético de los ventiladores. Para realizar el correcto enfriamiento adiabático se necesitan sistemas nebulizadores de alta presión, que permitan la evaporación del agua y por tanto, el enfriamiento del aire que será introducido en el equipo mejorando el intercambio de calor lo que conlleva a otras ventajas como la reducción en la superficie de intercambio, lo que permite seleccionar equipos más pequeños y más económicos.



Figura 20: Diferentes geometrías aerorefrigeradores [13]

5.4.2 Precalentador de aire

Los precalentadores de aire se pueden clasificar en dos grandes grupos en función del principio operativo de intercambio de calor:

5.4.2.1. Recuperativos

El intercambio de calor se produce por medio de una superficie de intercambio, ya sea mediante un conjunto de tubos o de placas paralelas, sin que exista un contacto entre ambos fluidos de proceso. Fundamentalmente se pueden encontrar los siguientes precalentadores:

- **Precalentadores tubulares de acero:** Son básicamente intercambiadores de calor de carcasa-tubo donde los gases de combustión circulan por el interior de los tubos mientras que el aire circula por el exterior, dentro de una carcasa de acero que contiene las aberturas de entrada y salida de ambos fluidos. En cuanto a la configuración de flujos, los humos circulan verticalmente por el interior de los tubos y en contracorriente circula el aire desplazándose horizontalmente como se puede ver en la siguiente figura.

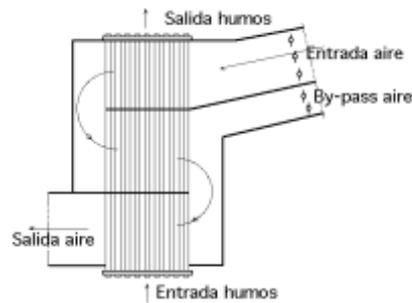


Figura 21: Precalentador tubular de acero

- Precalentador de chapas: Este precalentador consta de una serie de placas (chapas) en paralelo dónde se produce la transferencia de calor entre la corriente de gases de combustión y el aire frío con circulación en flujo cruzado. Generalmente, el sellado que se produce en los bordes de las placas se obtienen por soldadura.

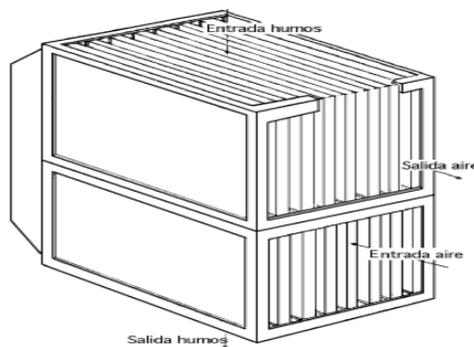


Figura 22: Precalentador de chapas

5.4.2.2. Regenerativos

En esta tipología de intercambiadores se produce la transferencia de calor de forma indirecta, a través de un medio de almacenamiento de energía térmica que bien sea por rotación o con sistemas de inversion de flujos, se expone a los flujos fríos y calientes, sirviendo como medio de almacenamiento de calor. Principalmente los intercambiadores más representativos son los siguientes:

- Precalentador Ljungstrom: Está constituido por una carcasa exterior de geometría cilíndrica y un rotor que gira formado por una serie de elementos que conforman la superficie calefactora y atraviesa la corriente de aire y gases de combustión que circulan en contracorriente. Los conductos de entrada y salida de ambas corrientes están unidos a ambos extremos de la carcasa.

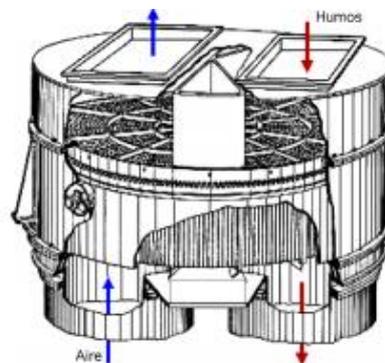


Figura 23: Precalentador regenerativo Ljungstrom

- Precalentador Rothemuhle: Este intercambiador está conformado por una carcasa fija (estator) en cuyo interior se alojan los elementos de superficie acumuladoras de calor y unos conductos giratorios por

donde circula el aire, ya que requiere menor potencia en ventiladores, y por tanto los gases de combustión circulan por el exterior de los conductos. Ambos fluidos circulan con disposición en contracorriente.

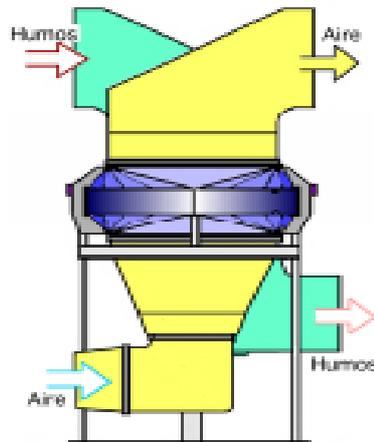


Figura 24: Precalentador Rothermuhle

Los principales problemas de este tipo de intercambiadores son el alto mantenimiento requerido, además de las elevadas fugas que presentan, es decir, el aire pasa al lado de los gases de combustión disminuyendo la eficiencia térmica del precalentador de aire [14]. Y debido a que la instalación presenta ya de manera inherente un elevado porcentaje de fugas y pérdidas, no se puede incrementar aún más. Por tanto, se selecciona el precalentador de aire recuperativo de chapas.

Finalmente, una vez presentadas las diferentes soluciones propuestas es necesario abordar el dimensionado de los siguientes equipos: aerorefrigerador y precalentador de aire de chapas como dispositivos de reducción de temperatura y, por otro lado, filtro de mangas y precipitador electrostático como sistemas de captación de partículas, pero antes se muestran los diferentes diagramas de proceso posibles para las distintas combinaciones seleccionadas.

1. Situación 1: Aerorefrigerador junto con el equipo de captación, filtro de mangas o precipitador electrostático (Figura 25)
2. Situación 2: Precalentador de aire más equipo de captación de partículas (Figura 26)

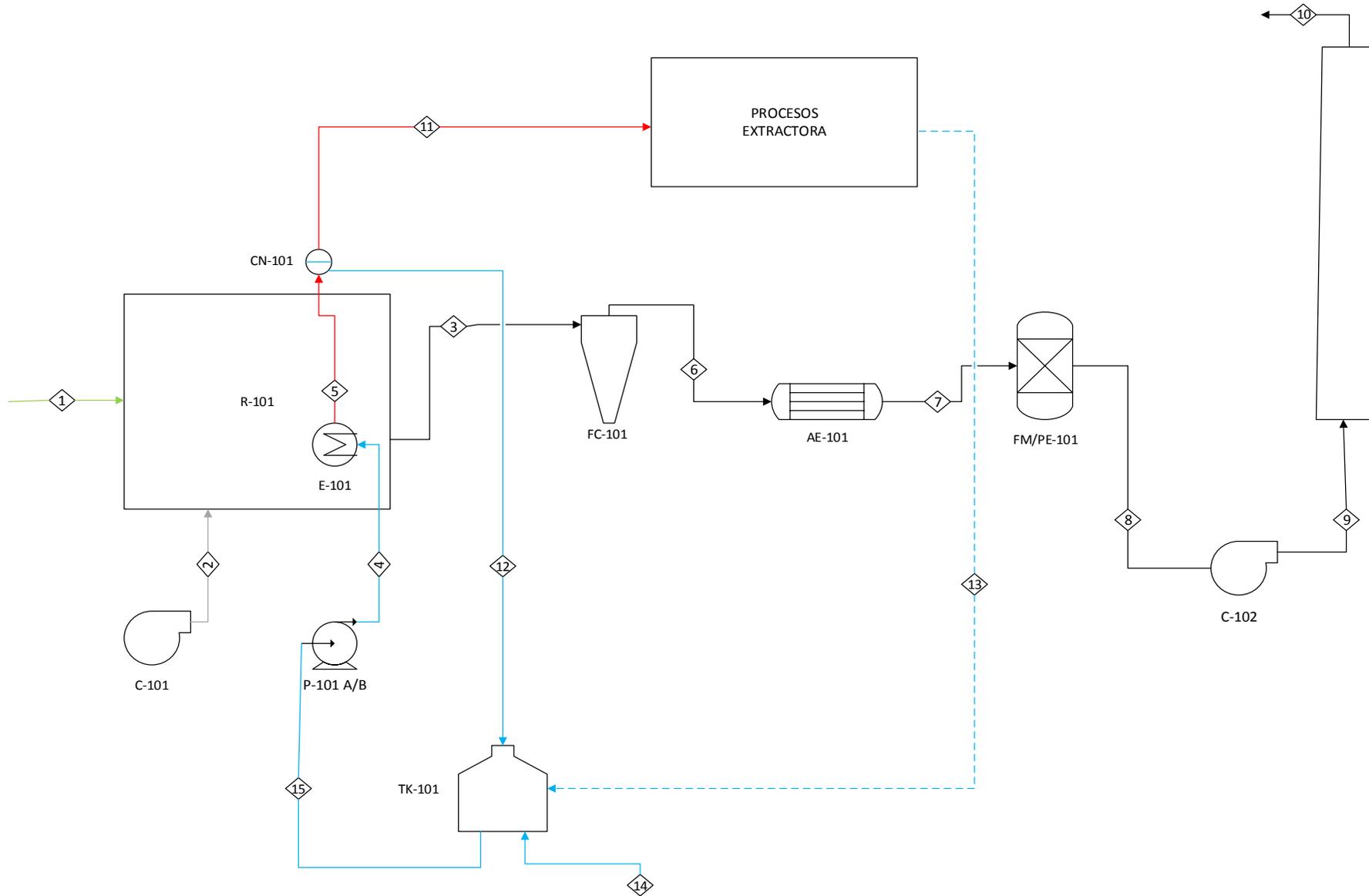


Figura 25: Situación 1

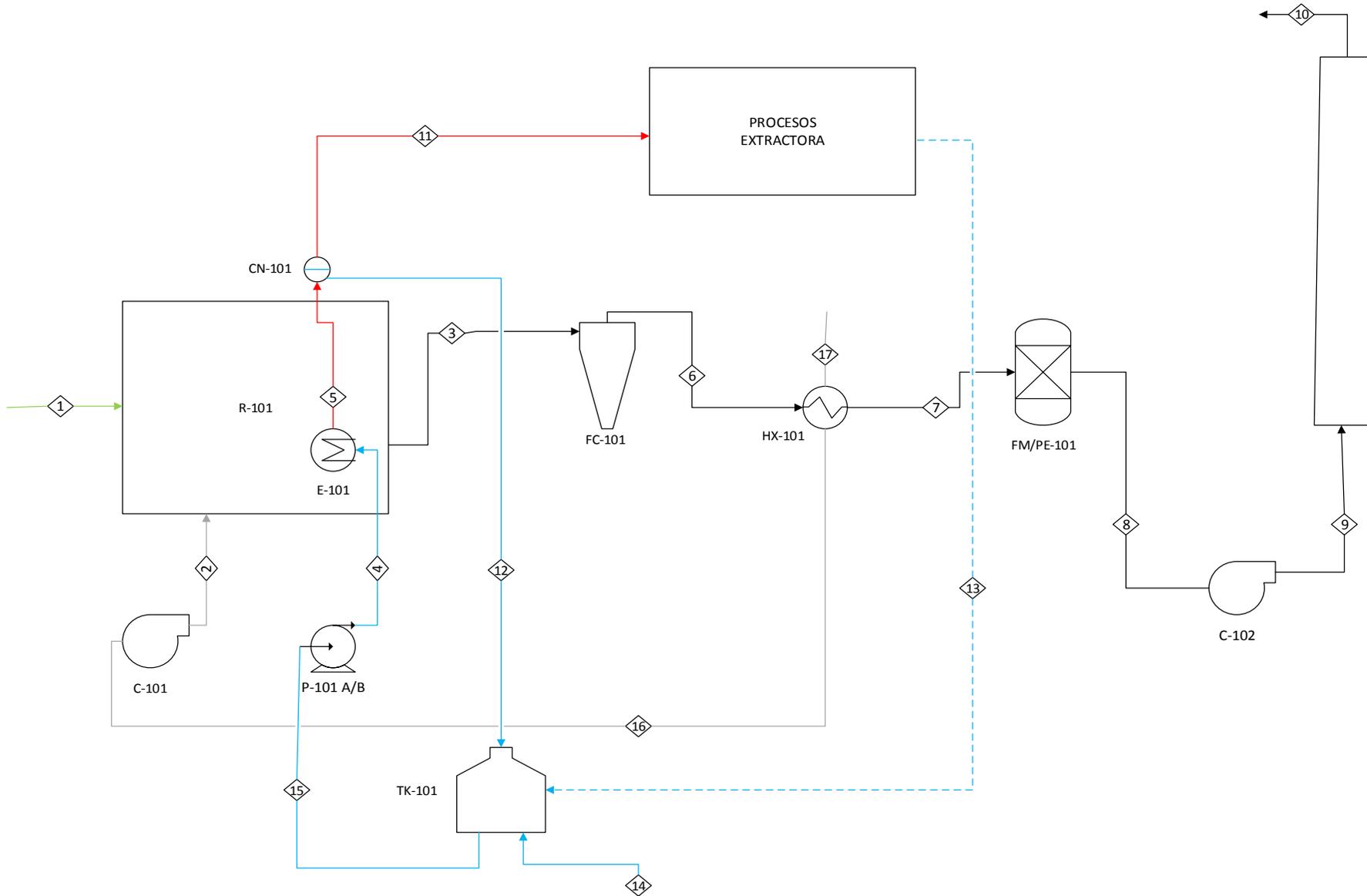


Figura 26: Situación 2

6 MEMORIA DE CÁLCULO

En esta sección se procede al cálculo y análisis tanto del balance de materia como de energía, además de realizar un análisis de grados de libertad con la finalidad de definir completamente todas las corrientes y comprobar que no haya presente ningún grado de libertad. Por lo tanto, se realiza un análisis de grados de libertad previamente al desarrollo de los balances que se detalla en el siguiente apartado.

Para la resolución de los balances se han tomado como datos de partida aquellos que han sido proporcionados por la empresa a la que se destina el estudio, pero debido a la falta de información relevante en cuanto a caudales y composiciones se refiere, se han tomado como referencia los datos medidos por ATISAE, empresa que realizó la última inspección en la extractora durante el día 27 de febrero de 2018. A continuación, se muestra una tabla dónde aparecen todos los datos de partida disponible, en cambio las casillas que aparecen de color gris de fondo son aquellos valores que hay que determinar durante el balance de materia y energía para cerrar de forma completa el caso inicial.

	1	2	3	4	5	6	16
Temperatura (°C)	25	25	383	60	173	311	25
Presión (atm)	1	1	1	1	8,5	1	1
Fracción de vapor	0	1	1	0	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	800					13893,4	
Flujo molar (kmol/h)	-					475,8	
Componentes (%)							
Orujillo	100	-	-	-	-	-	-
Oxígeno	-	21		-	-	16,2	21
Nitrógeno	-	79		-	-		79
Agua	-	-		100	100	5,1	-
Dióxido de carbono	-	-		-	-		-
Monóxido de carbono	-	-		-	-	0,1	-

Tabla 6: Datos de partida

Además, para determinar la composición completa del orujillo se ha recurrido a información bibliográfica [17] debido a que la empresa no dispone de datos de análisis elemental del combustible, información necesaria para poder cerrar tanto el balance de materia como de energía. Se muestra a continuación en la Tabla 7:

ANÁLISIS ELEMENTAL	
Composición	Base seca (%)
C	50,02
H	5,88
S	0,14
Cl	0,26
O	39,3
ANÁLISIS BÁSICO	%
Humedad (b.h.)	9,88
Cenizas (b.s.)	7,2
Volátiles (b.s.)	73,53
PODER CALORÍFICO	(kcal/kg)
PCI (b.s.)	4434
PCI (b.h.)	4118

Tabla 7: Análisis completo del orujillo

Por lo tanto, una vez definido el origen y determinado los datos de partida se procede al desarrollo del análisis de grado de libertad, así como el posterior cálculo del balance de materia y de energía.

6.1. Análisis de grados de libertad

El cálculo de grados de libertad es una herramienta habitual en el análisis de procesos químicos empleado para identificar si el problema de balance de materia y energía está completamente determinado, es decir, si está especificado correctamente y tiene una única solución.

La realización del análisis de grados de libertad en la etapa de planteamiento inicial es muy importante, ya que se consigue determinar si el problema tiene solución o no, además de asegurar si el problema dispone de suficiente información como para especificarlo completamente antes de realizar directamente los cálculos, lo que supone un esfuerzo y un tiempo dedicado menor para encontrar dicha solución.

Se trata de un mecanismo sistemático con objeto de contar todas las ecuaciones de balance (materia y energía), así como las variables y las relaciones presentes en el problema. Este análisis determina los grados de libertad con relación a las condiciones de operación, por lo que no está relacionado con parámetros de diseño como por ejemplo el tamaño de la caldera o el número de tubos presentes en el interior de ella.

Para el caso estudiado se va a realizar el análisis de grados de libertad centralizado exclusivamente en la zona PIG7 de la instalación. Se tiene en cuenta tanto el balance de materia como el de energía para la realización de este análisis.

De forma genérica los grados de libertad (GL) se expresan de la siguiente forma:

$$GL = N_V - (N_{EB} + N_{RES} + N_{ESP}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

- $GL \equiv$ Número de grados de libertad
- $N_V \equiv$ Número de variables del sistema
- $N_{EB} \equiv$ Número de ecuaciones del sistema
- $N_{RES} \equiv$ Número de restricciones
- $N_{ESP} \equiv$ Número de especificaciones

Para determinar el número de variables del sistema hay que tener en cuenta el número de componentes del sistema, presión y temperatura de cada corriente más el número de equipos y el número de reacciones que se producen en él. Por lo tanto, se define mediante la siguiente expresión:

$$N_V = (N_C + 2) \times N_{CORR} + N_{EQ} + N_R \quad (\text{Ec. 3})$$

Dónde:

- $N_C \equiv$ Número de componentes
- $N_{CORR} \equiv$ Número de corrientes
- $N_R \equiv$ Número de reacciones
- $N_{EQ} \equiv$ Número de equipos

El número de ecuaciones de balance se corresponde al número de balances de materia, tantos como componentes haya presente, además del balance de energía. Se suele expresar de la siguiente forma:

$$N_{EB} = N_C + 1 \quad (\text{Ec. 4})$$

El análisis de grados de libertad se va a realizar exclusivamente para la caldera de vapor, se puede asumir que para este equipo no hay posibles restricciones, así que el término N_{RES} se toma como cero; además la variable que hace relación al número de equipos corresponde a $N_{EQ} = 1$.

Por último, se realizan una serie de aclaraciones e hipótesis necesarias para simplificar el cálculo de grados de libertad.

Para determinar el número de componentes que intervienen en el proceso de combustión se tienen en cuenta una serie de simplificaciones:

- Se toman aquellos componentes presentes en el combustible como son el carbono, azufre, hidrógeno atómico además del oxígeno, despreciando el resto de los componentes minoritarios ya que se encuentran en una proporción despreciable frente a los seleccionados.
- Además de los componentes de los gases de combustión que aparecen en los datos de partida como son el CO₂, CO, H₂O(v) de los componentes presentes en el combustible, se tiene en cuenta el SO₂.
- Con respecto a la corriente de aire es necesario añadir sus dos componentes principales como son el oxígeno y el nitrógeno. Se asume despreciable la proporción de humedad del aire.

De esta forma se puede concluir que el número de componentes es igual a 9.

En cuanto al número de reacciones producidas se toman en cuenta las 4 principales como son la oxidación de carbono a CO₂ o a CO, más la oxidación de azufre a SO₂ y por último la conversión de hidrógeno a agua. También se asume despreciable otras reacciones de oxidación minoritarias.

A continuación, se describe el número de especificaciones existentes en el problema:

La presión y temperatura se encuentran especificadas para cada corriente. Por lo tanto, existen 10 especificaciones en relación con P y T.

- La alimentación de orujillo está totalmente definida en cuanto a composición y caudal así que constituyen 11 especificaciones.
- La alimentación de aire suma 10 especificaciones, ya que su composición está definida pero no el caudal suministrado.
- Tanto la corriente 4 (agua) como la 5 (vapor) suman 10 especificaciones cada una por la misma razón que el anterior.
- La corriente de gases de chimenea debido a que tiene definido su caudal, así como alguno de sus componentes, representan en total 9 especificaciones.

En la siguiente figura se observa de forma resumida el número de especificaciones previamente comentadas.

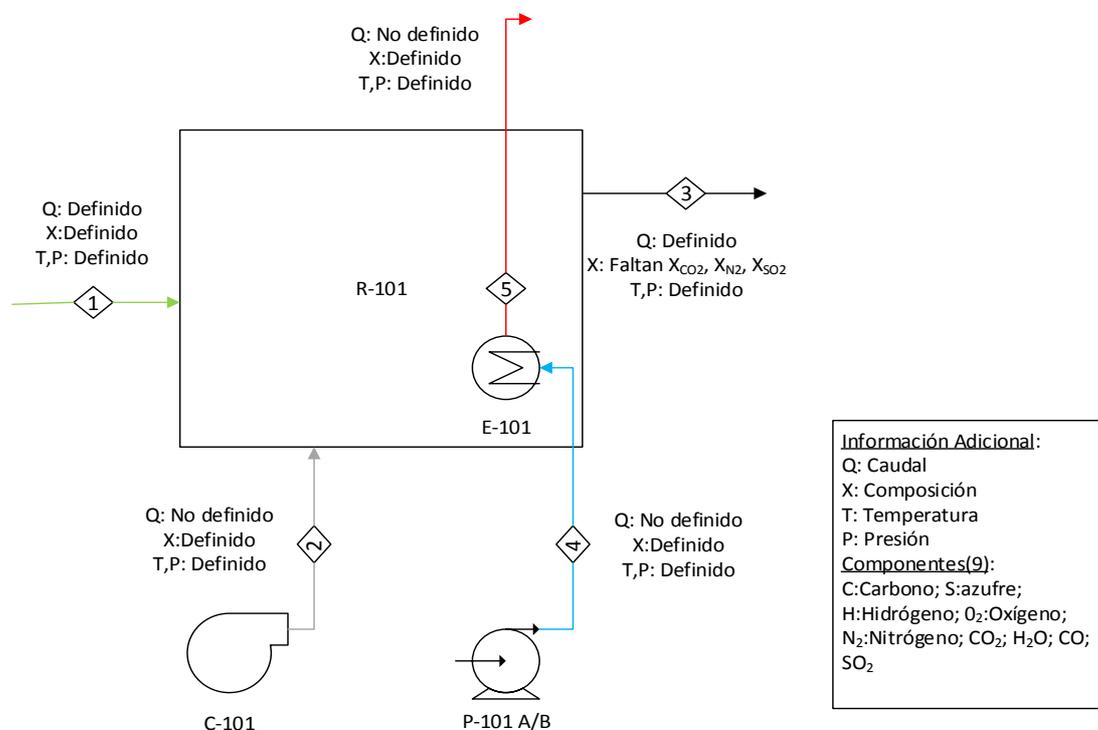


Figura 27: Especificaciones distintas corrientes del sistema.

En definitiva, el total del número de especificaciones corresponde con el valor que se muestra en la Tabla 8.

Así que una vez definidas dichas aclaraciones se proceden a la determinación de los grados de libertad siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Los resultados aparecen recogidos en la siguiente tabla.

N_C	9	N_V	60
N_{CORR}	5	N_{EB}	10
N_{EQ}	1	N_{RES}	0
N_R	4	N_{ESP}	50
		GL	0

Tabla 8: Resolución cálculo de grados de libertad

Finalmente, el número de grados de libertad es igual a cero, por lo que para terminar este análisis se puede asegurar que tanto el balance de materia como de energía están completamente determinado, por lo que el problema está bien especificado y por tanto tiene una única solución.

6.2. Balance de materia y energía

Los balances de materia y energía realizados para este proyecto son necesarios para definir completamente los caudales y composiciones de cada corriente, con especial interés en el caudal de aire introducido en caldera, ya que como puede verse en la Tabla 6 no constituye un dato de partida, por lo que hay que determinarlo ya que se trata de un parámetro clave para el diseño de equipos posteriores.

El propósito de definir la corriente de aire está orientado al dimensionado del precalentador de aire que se explicará en apartados posteriores, ya que como se comentó es una de las distintas alternativas presentadas para reducir la temperatura de gases de combustión y por consiguiente mejorar la eficiencia energética de la planta.

A continuación, se muestra el diagrama de proceso de la instalación centralizado en la línea de estudio.

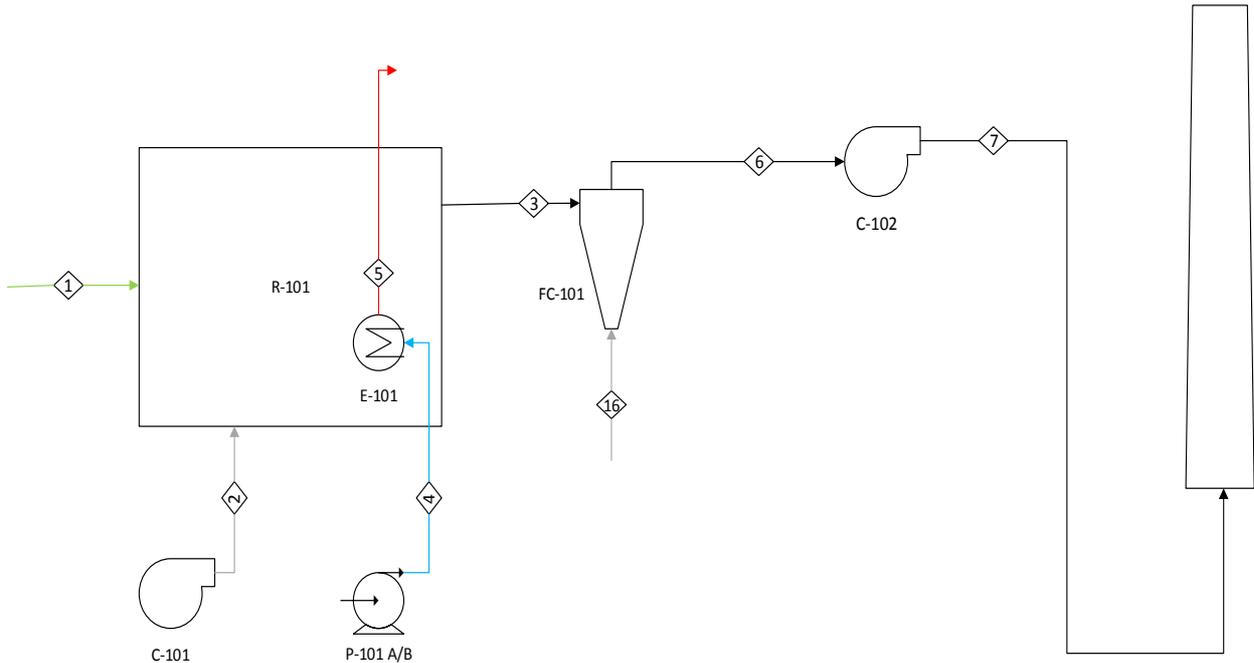


Figura 28: Diagrama de proceso línea de estudio

Como se puede observar en la figura anterior se ha añadido una corriente adicional al diagrama, más concretamente la corriente 16, ya que según los análisis aportados por ATISAE durante su última inspección se registra un valor de 16,2% de O_2 en la corriente 7, además como se puede observar en la Figura 18 y Figura 19 existe una disminución brusca de temperatura entre entrada y salida del ciclón, asociado a pérdidas energéticas en cuanto a infiltraciones de aire que reducen la temperatura, además de que se trata de un equipo no calorifugado.

A pesar de las infiltraciones de aire este valor registrado constituye un valor demasiado elevado, por lo tanto, se procede a comprobar dichos valores realizando los balances de masa y energía.

A continuación, se explica la resolución tanto del balance de materia como de energía detallando el procedimiento y los cálculos necesarios para cerrar el caso completo. Para ello, se realizan los siguientes pasos:

1. Balance de energía en ciclón FC-101 con objeto de determinar F_3 (kg/h).
2. Balance de materia en el ciclón para cuantificar F_{16} (kg/h).
3. Balance de materia en la caldera R-101 para determinar el exceso de aire y % O_2 en la corriente 3.
4. Determinación del % O_2 en la corriente 6 planteando un balance de materia respecto al O_2 .
5. Planteamiento de ecuaciones de balance de energía en la caldera R-101 para determinar F_4 .

Para el desarrollo de las ecuaciones de balance se van a tener en cuenta que tanto en la caldera de vapor como en el ciclón se supone un valor de 10% de pérdidas energéticas debido a pérdidas conductivas de calor por ausencia de aislamiento, inquemados, fugas, etc.

También hay que tener en cuenta parámetros termodinámicos obtenidos a partir de tablas termodinámicas [15] y valores recomendados [16] para realizar los balances de energía.

C_{p_2} (kJ/kg·K)	1,01
C_{p_4} (kJ /kg·K)	4,14
C_{p_5} (kJ /kg·K)	2,64
C_{p_3} (kJ /kg·K)	1,03
$\lambda_{vap}(8,5 \text{ bar})(\text{kJ /kg})$	2761

Tabla 9: Propiedades termodinámicas

En primer lugar, se plantean las ecuaciones del balance de energía y balance de materia respectivamente en el ciclón FC-101. Además, se supone un 10% de pérdidas energéticas en el ciclón:

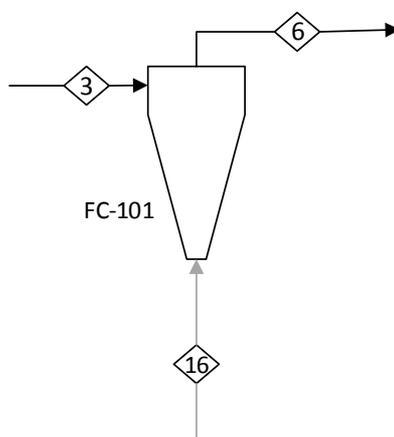


Figura 29: Ciclón FC-101

$$F_3 \cdot C_{p_3} \cdot (T_3 - T_{ref}) + F_{16} \cdot C_{p_{16}} \cdot (T_{16} - T_{ref}) = F_6 \cdot C_{p_6} \cdot (T_6 - T_{ref}) \cdot 0,9 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$F_3 + F_{16} = F_6 \quad (\text{Ec. 6})$$

Dónde:

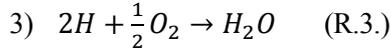
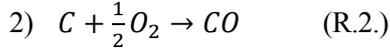
- F_i : Caudal másico (kg/h) corriente i
- C_{p_i} : Capacidad calorífica corriente i (kJ /kg·K)
- T_i : Temperatura corriente i (°C)
- T_{ref} : Temperatura de referencia (°C). Se considera $T_{ref}=25$ °C

A continuación, con objeto de determinar el exceso de aire introducido en caldera y el % O₂ en la corriente 3 es necesario plantear las ecuaciones del balance de materia. Ante todo, se emplean los caudales molares disponibles para facilitar la resolución del problema. Seguidamente se muestran los flujos molares de los siguientes componentes que forman el combustible basándose en la información recogida de la Tabla 7.

	C	H	S	O
Flujo másico (kg/h)	400,16	7,74	1,12	314,4
Flujo molar (kmol/h)	33,35	7,74	0,035	19,65

Tabla 10: Flujo molar de los componentes del combustible

En la combustión del orujillo las reacciones fundamentales que ocurren son las siguientes:



Se asume que el combustible se quema totalmente. Además, debido a la ausencia de análisis de cenizas no es posible determinar la cantidad que se forman de estas. Por lo tanto, se supone que todo el carbono disponible se oxida a CO_2 o a CO . El flujo molar de monóxido de carbono se determina a partir de los datos disponibles de la corriente 6, y por diferencia con el carbono disponible se obtienen los kmol/h de CO_2 . A continuación, se muestran la expresión del oxígeno teórico necesario para oxidar la totalidad del combustible.

$$F_{O_2_{teo}} = F_{O_2_{R1}} + F_{O_2_{R2}} + F_{O_2_{R3}} + F_{O_2_{R4}} - F_{O_2_{comb}} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$F_{N_2_{teo}} = F_{O_2_{t}} \cdot \frac{79}{21} \quad (\text{Ec. 8})$$

Definiendo el oxígeno y nitrógeno alimentado al reactor (corriente 2),

$$F_{O_2_2} = F_{O_2_{teo}} \cdot (1 + e) \quad (\text{Ec. 9})$$

$$F_{N_2_2} = F_{N_2_{teo}} \cdot (1 + e) \quad (\text{Ec. 10})$$

Dónde:

- $F_{i_{teo}}$: Caudal molar de oxígeno o hidrógeno teórico (kmol/h).
- F_{i_2} : Caudal molar de oxígeno o hidrógeno alimentado (kmol/h).
- e : Exceso de aire expresado en tanto por uno.

Finalmente, con el caudal de la corriente 3 obtenido en el primer paso, se procede a determinar el exceso de aire alimentado (e) y como consecuencia se fijan los caudales molares de cada uno de los componentes presentes en los gases de combustión cerrando el balance de materia de la línea de estudio. Las expresiones se muestran a continuación.

$$F_{O_2_3} = F_{O_2_2} - F_{O_2_{teo}} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$F_{N_2_3} = F_{N_2_2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$F_{CO_2_3} = 33,33 \quad (\text{Ec. 13})$$

$$F_{CO_3} = 0,47 \quad (\text{Ec. 14})$$

$$F_{SO_2_3} = 0,35 \quad (\text{Ec. 15})$$

$$F_{H_2O_3} = 24 \quad (\text{Ec. 16})$$

$$F_3 = F_{O_2_3} + F_{N_2_3} + F_{CO_2_3} + F_{CO_3} + F_{SO_2_3} + F_{H_2O_3} \quad (\text{Ec. 17})$$

El exceso de aire alimentado expresado en tanto por ciento es del 95%.

El siguiente paso consiste en determinar el porcentaje de oxígeno presente en la corriente 6 tras realizar un balance de materia respecto al oxígeno en el ciclón FC-101.

$$F_{O_2_6} = F_{O_2_3} + F_{O_2_{16}} \quad (\text{Ec. 18})$$

Para finalizar y definir completamente el problema inicial se plantea la ecuación de balance de energía en la caldera con objeto de cuantificar el calor generado y por tanto, definir el caudal de vapor producido por esta en condiciones normales de operación.

$$F_1 \cdot PCI + F_2 \cdot C_{p_2} \cdot (T_2 - T_{ref}) = Q + F_3 \cdot C_{p_3} \cdot (T_3 - T_{ref}) \quad (\text{Ec. 19})$$

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtiene un calor generado de $Q = 10,1$ MJ/h. Una vez

cuantificado el calor generado en la caldera se determina el caudal másico de vapor planteando la siguiente ecuación. Además, se asume un 10% de pérdidas energéticas en la caldera de vapor.

$$Q = F_5 \cdot [C_{p_4} \cdot (173 - T_4) + \lambda_{vap(8,5 \text{ bar})}] \cdot \frac{1}{0,9} \quad (\text{Ec. 20})$$

Dónde:

- F_5 : Caudal másico (kg/h) corriente 5.
- T_4, T_5 : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de las distintas corrientes
- λ_{vap} : Entalpía de vaporización del agua (kJ/kg). Ver Tabla 9
- PCI : Poder calorífico inferior del orujillo en base húmeda (Tabla 7)
- $C_{p_3}, C_{p_4}, C_{p_5}$: Capacidad calorífica de gases de combustión, agua, y vapor respectivamente (Tabla 9).

Además, se determina la eficiencia térmica de la caldera haciendo uso de la siguiente expresión.

$$\eta_t = \frac{F_5 \cdot [C_{p_4} \cdot (173 - T_4) + \lambda_{vap(8,5 \text{ bar})}]}{F_1 \cdot PCI} \quad (\text{Ec. 21})$$

Se obtiene un valor de $\eta_t = 66\%$

Finalmente, se presenta a continuación una tabla con todos los resultados de los cálculos anteriormente planteados.

	1	2	3	4	5	6	16
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25	25	383	60	173	311	25
Presión (atm)	1	1	1	1	8,5	1	1
Fracción de vapor	0	1	1	0	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	800	8247,6	9989,3	2815,4	2815,4	13893,4	3904
Flujo molar (kmol/h)	-	284,4	342,1	156,4	156,4	475,8	134,6
Componentes (%)							
Orujillo	100	-	-	-	-	-	-
Oxígeno	-	21	7	-	-	11	21
Nitrógeno	-	79	76,2	-	-	77	79
Agua	-	-	7	100	100	5	-
Dióxido de carbono	-	-	9,6	-	-	7	-
Monóxido de carbono	-	-	0,14	-	-	0,1	-
Dióxido de azufre	-	-	0,1	-	-	0,01	-

Tabla 11: Resolución balance de materia y energía

Una vez cerrado el balance, se confirma que las mediciones de oxígeno realizadas no son congruentes en relación con el caudal de gases de combustión, ya que como se observa en la tabla anterior la composición de oxígeno representa un valor más fiable.

En cambio, el valor de humedad medido por ATISAE coincide con el calculado mediante los balances de materia y energía.

Como se puede observar el ciclón supone importantes pérdidas energéticas, que provoca una reducción de temperatura lo que disminuye la eficiencia energética de la instalación, además de aumentar el caudal volumétrico de los gases de combustión asociados a las infiltraciones de aire.

Con el desarrollo de este análisis de balance de materia y energía de la situación inicial, se procede a dimensionar los distintos quipos seleccionados anteriormente y entre ellos, el precalentador de aire con objeto de aumentar la eficiencia energética de la instalación, además del ahorro de combustible anual que supone.

6.3. Prediseño de equipos

En este apartado se aborda el diseño de todos aquellos equipos que pueden considerarse como alternativa para el problema de control de partículas más la reducción de temperatura necesaria, con el propósito final de seleccionar aquellos equipos que se consideren más adecuado desde el punto de vista tecno-económico.

6.3.1. Pre calentador de aire

Como se ha detallado en apartados anteriores el pre calentador seleccionado es conocido como pre calentador de chapas, considerado como un intercambiador de placas con disposición de fluidos en contracorriente. A continuación, se explica el procedimiento necesario para diseñar el equipo.

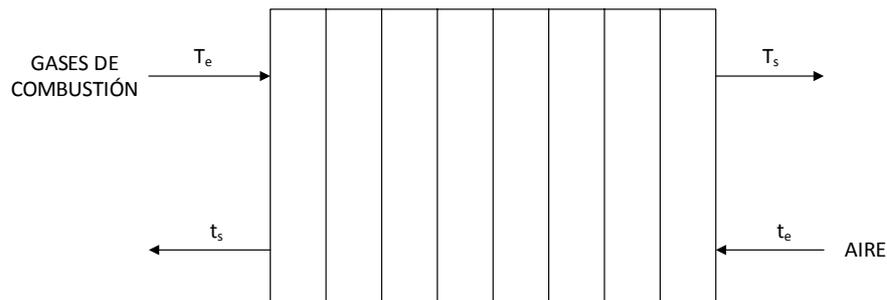


Figura 30: Pre calentador de aire

Los datos de partida disponibles para el dimensionado del intercambiador son los siguientes:

\dot{m}_{GC} (kg/h)	\dot{m}_{air} (kg/h)	T_e (°C)	t_e (°C)
13893,4	8247,6	311	25

Tabla 12: Datos de partida diseño pre calentador

Estableciendo la ecuación del balance de energía en el intercambiador entre el fluido caliente (gases de combustión) y el fluido frío (aire):

$$\dot{m}_{GC} \cdot C_{P_{Gases}} \cdot (T_e - T_s) = \dot{m}_{air} \cdot C_{P_{aire}} \cdot (t_s - t_e) \quad (\text{Ec. 22})$$

Dónde:

- \dot{m}_i : Flujo másico corriente de gases de combustión y aire (kg/h).
- C_{P_i} : Capacidad calorífica específica de los fluidos (kcal/kg·K). Ver Tabla 9.
- T_i : Temperatura de entrada o salida corriente gases de combustión (°C).
- t_i : Temperatura de entrada o salida corriente de aire (°C).

Se asume una temperatura de salida de humos de $T_s=165^\circ\text{C}$, para evitar la formación de condensados por tuberías. De esta forma, se puede obtener la temperatura de salida de la corriente de aire despejando de la ecuación anterior, obteniéndose un valor de $t_s=270^\circ\text{C}$.

Una vez definido el balance de energía se procede al dimensionado del equipo por el método ϵ -NTU. Para ello, se van a determinar dos parámetros ϵ y C^* , y posteriormente con ayuda de la Figura 31 se obtiene el valor de NTU.

$$\epsilon = \frac{Q_{real}}{Q_{m\acute{a}x}} = \frac{\dot{m}_{GC} \cdot C_{P_{GC}} \cdot (T_e - T_s)}{C_{min} \cdot (T_e - t_e)} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{m\acute{a}x}} \quad (\text{Ec. 24})$$

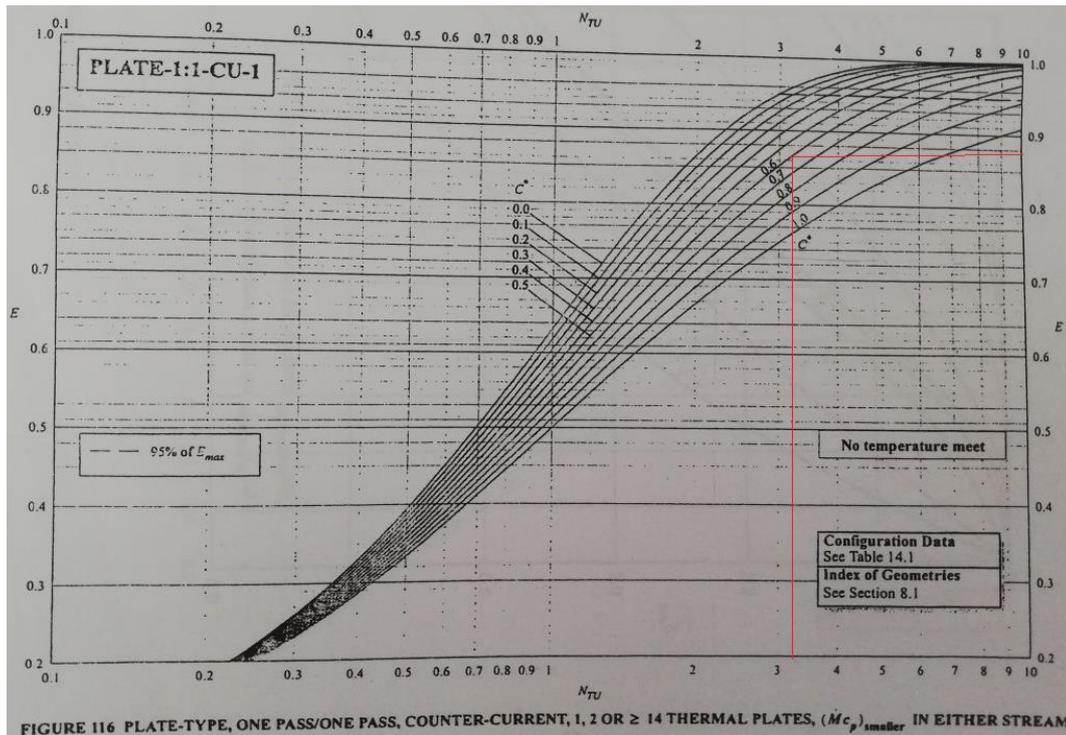


Figura 31: Gráfico NTU para intercambiadores de placas

Sustituyendo los valores en las ecuaciones anteriores se obtiene un valor de $\epsilon=0,87$ y $C^*=0,6$. Por lo tanto, según la Figura 31 el valor de $NTU=3,2$. A continuación se expresa la ecuación que relaciona el área de transferencia del intercambiador con NTU.

$$NTU = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (\text{Ec. 24})$$

El valor del coeficiente global de transferencia de calor (U) para intercambiador de placas con combinación gas-gas suele ser del orden de 10-35 W/m²·K. Se toma un valor intermedio de U= 25 W/ m²·K.

Por lo tanto, despejando el valor del área de transferencia y aplicando un coeficiente de seguridad del 10% se obtiene un valor de:

$$A = 326 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 25})$$

Una vez definida el área de transferencia necesario es posible calcular el número de placas que conformarían el conjunto del intercambiador. Para ello, es necesario definir previamente las dimensiones de las placas utilizadas. Primero, se ha realizado una búsqueda bibliográfica de diferentes fabricantes de intercambiadores de placas, y después dentro de la amplia tipología de placas existentes se ha elegido aquella tal que permita soportar las condiciones operativas (caudal, temperatura, etc).

Finalmente, se ha optado por placas provenientes del suministrador Funke, debido a su disponibilidad de datos, así como de la amplia gama de tamaños que presenta permitiendo ajustarse a cualquier aplicación posible. Se trata del modelo FP 112-6/10/16/25, cuya superficie de placa es 1,12 m² (Ver Anexo 1). Por lo tanto, una vez conocida el área por placa haciendo uso de la siguiente expresión se determina el número de placas necesarios.

$$A = (N_p - 2) \cdot A_p \quad (\text{Ec. 26})$$

Dónde:

- A: Área de transferencia (m²).
- A_p: Área por placa (m²).
- N_p: Número de placas.

Sustituyendo y resolviendo, se obtiene un valor de:

$$N_p = 292 \text{ placas} \quad (\text{Ec. 27})$$

De las cuales, 290 se consideran placas térmicas y 2 situadas a cada extremo del intercambiador son placas extremas de material no conductor.

Posteriormente, es necesario definir el número total de canales y fijar la configuración del precalentador, mediante la siguiente expresión:

$$N_c = N_{pt} + 1 \quad (\text{Ec. 28})$$

Dónde:

- N_c : Número de canales totales.
- N_{pt} : Número de placas térmicas.

Además, se considera: un paso para cada fluido con disposición en contracorrie

N_c	291
Nº pasos gases de combustión	1
Nº pasos aire	1
Disposición	Contracorriente

Tabla 13: Disposición del precalentador

Finalmente, se muestra una figura dónde se puede observar de manera práctica la circulación de los fluidos por el intercambiador diseñado.

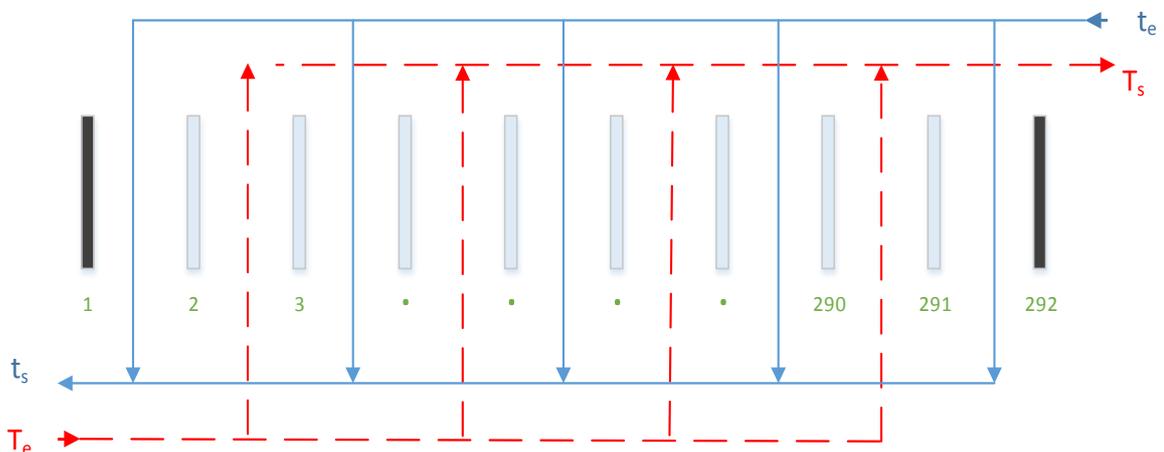


Figura 32: Disposición de fluidos

En esta sección también se realiza la estimación de la pérdida de carga que sufre la corriente de gases de combustión tras pasar por el precalentador de aire. Luego, usando la ecuación propuesta por Cooper se puede calcular de manera aproximada la caída de presión [19].

$$\Delta P = \frac{2 \cdot f \cdot G^2 \cdot L}{g \cdot D_h \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 29})$$

Dónde:

- f : Factor de fricción. Se calcula mediante la ecuación 30.

- G : Gasto másico humos ($\text{kg/m}^2\text{h}$). Se determina dividiendo el flujo másico entre el área transversal del conjunto de canales
- L : Longitud de flujo desarrollado (m). Se calcula mediante la ecuación 31.
- D_h : Diámetro hidráulico. Se considera el doble de la distancia de separación entre placas (b).
- g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).
- ρ : Densidad expresada en kg/m^3 .

$$f = \frac{2,5}{Re^{0,3}} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$L = \frac{A_p}{W} \quad (\text{Ec. 31})$$

Dónde:

- A_p : Área de placa (m^2).
- W : Ancho de placa (m).

A su vez, es necesario determinar el número de Reynolds considerando flujo en paralelo para calcular el factor de fricción.

$$Re = \frac{\left(\frac{G}{N_{Pt}}\right) \cdot D_h}{\mu} \quad (\text{Ec. 32})$$

Finalmente, sustituyendo y despejando los parámetros en las ecuaciones anteriores se determina la pérdida de carga.

ΔP (kg/m^2)	174
ΔP (mmca)	174

Tabla 14: Pérdida de carga

En el caso de que esta medida de reducción de temperatura fuese la elegida supondría un aumento de la eficiencia energética de la instalación, traducido en un ahorro de combustible, en este caso orujillo. Para cuantificarlo es necesario plantear de nuevo la ecuación del balance de energía estableciendo como incógnita el caudal másico de orujillo (F_1') y tomando en este caso la temperatura de alimentación de aire como $T_2=270^\circ\text{C}$. Además, como el calor generado es $Q=1,01 \text{ MJ/h}$ se sustituyen los valores y se determina F_1'

$$F_1' \cdot PCI + F_2 \cdot c_{p_{aire}} \cdot (T_2 - T_{ref}) = Q + F_3 \cdot c_{p_{gases}} \cdot (T_3 - T_{ref}) \quad (\text{Ec. 32})$$

Despejando el caudal másico de orujillo se obtiene un valor de $F_1' = 682 \text{ kg/h}$.

Se plantea la siguiente ecuación con objeto de determinar el ahorro de combustible que supondría porcentualmente.

$$\text{Ahorro (\%)} = \frac{F_1 - F_1'}{F_1} \quad (\text{Ec. 34})$$

F_1 (kg/h)	800
F_1' (kg/h)	682
Ahorro (%)	15

Tabla 15: Ahorro de combustible

Por lo tanto, considerando que la actividad media anual de la planta es de 2208h se puede cuantificar el ahorro

anual que supondría la incorporación de un precalentador de aire dentro de la instalación.

$$\text{Ahorro anual} = (F_1 - F_1') \cdot t_{\text{operación}} \quad (\text{Ec. 33})$$

Dónde:

- F_1, F_1' : Caudales máscicos (kg/h) de orujillo situación inicial y situación precalentador respectivamente.
- $t_{\text{operación}}$: Tiempo de funcionamiento anual de la caldera (h). Ver Tabla 3.

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtiene un ahorro anual de **261539 kg** combustible.

6.3.2. Aerorefrigerador

En este apartado se procede al diseño del aerorefrigerador como posible solución para enfriar los gases de combustión procedentes de la caldera de vapor, lo que supone un enfriamiento brusco sin aprovechamiento energético. Para ello, se elige un aerorefrigerador en forma de V debido a su geometría más compacta y por su fácil accesibilidad al mercado.

El procedimiento de dimensionado se realiza mediante una serie de pasos, concretamente:

1. Se realiza un balance energético en el equipo con objeto de cuantificar el caudal de aire necesario para refrigerar los gases de combustión.
2. Seleccionar modelo aerorefrigerador más adecuado y fijar el área de transferencia.
3. Determinar número de tubos y longitud requerida.

Previamente, se establecen los datos de partida en la siguiente tabla:

\dot{m}_{GC} (kg/h)	T_e (°C)	T_s (°C)	t_e (°C)	t_s (°C)
13893,4	311	165	25	90

Tabla 16: Datos de partida aerorefrigerador

En primer lugar, se plantea la ecuación de balance energético en el aerorefrigerador donde se obtiene:

$$\dot{m}_{GC} \cdot C_{P_{Gases}} \cdot (T_e - T_s) = \dot{m}_{air} \cdot C_{P_{aire}} \cdot (t_s - t_e) \quad (\text{Ec. 34})$$

\dot{m}_{air} (kg/h)	31825
F_{air} (m ³ /h) *	29467

Tabla 17: Caudal de aire requerido

(*El caudal expresado en unidades volumétricas se ha obtenido a partir de la densidad del aire a una temperatura media)

En segundo lugar, para seleccionar el modelo que mejor se ajuste a las condiciones operativas establecidas se recurre a catálogo de fabricantes, concretamente procedente del 'Grupo iref'. El modelo seleccionado es el DCV-0415 ya permite circular el volumen de aire necesario, además de presentar un margen de seguridad suficiente como para escenarios donde sea necesario hacer circular un mayor caudal de aire por el aerorefrigerador. En la Figura 51, se puede observar los diferentes modelos disponibles.

A continuación, se presentan las características técnicas del equipo seleccionado:

Aerorefrigerador DCV-0415	
Superficie de intercambio (m ²)	448
Caudal de aire (m ³ /h)	31839
Dimensiones (mm)	2728 x 2262 x 2075
Peso (kg)	800
Número de ventiladores	4
Velocidad de giro (rpm)	330

Tabla 18: Características técnicas aerorefrigerador

En tercer lugar, se procede al cálculo del número de tubos necesarios por el que circula los humos procedentes de la caldera. Para ello, se recurre a la siguiente expresión:

$$N_t = \frac{\dot{m}_{GC}}{A_i \cdot v \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 35})$$

Dónde:

- N_t : Número de tubos
- \dot{m}_{GC} : Flujo másico que circula por los tubos (kg/h).
- A_i : Área interna de tubos (m²). Se determina mediante la siguiente ecuación.

$$A_i = \pi \cdot \frac{D_{int}^2}{4} \quad (\text{Ec. 36})$$

- v : Velocidad de circulación de los gases por el interior de los tubos (m/s). Se toma una $v=25$ m/s.
- ρ : Densidad de los gases de combustión (kg/m³). Se considera $\rho= 1,1$ kg/m³ (Informe Atisae).

Finalmente, una vez obtenido el número de tubos se fija la longitud requerida de cada uno de ellos haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$A = \pi \cdot D_{ext} \cdot L \cdot N_p \cdot N_t \cdot N_h \quad (\text{Ec. 37})$$

Dónde:

- A : Área de transferencia (m²). Ver Tabla 18.
- D_{ext} : Diámetro externo de los tubos (m).
- L : Longitud de tubos (m).
- N_p : Número de pasos por cada haz. Se considera $N_p=2$.
- N_t : Número de tubos.
- N_h : Número de haces. $N_h=2$, uno situado a cada lado representando la forma en V.

Para determinar el diámetro exterior de los tubos se recurre a valores normalizados existentes en el mercado, se toma un valor de 1" de calibre BWG 10. Por lo tanto, recurriendo a tablas de datos de tubos de intercambiadores, con la relación siguiente se determina el diámetro interno:

$$\frac{D_{ext}}{D_{int}} = 1,366 \quad (\text{Ec. 38})$$

A continuación, se muestran los resultados finales:

Número de tubos	517
Longitud (m)	2,6

Tabla 19: Número de tubos y longitud requerida.

El valor de la longitud de tubos está de acuerdo a las dimensiones del equipo, ya que está por debajo de la longitud del aerorefrigerador de 2730 mm. A continuación, se realiza una corrección en el número de tubos con objeto de disminuir la cantidad de tubos por haz. Para ello, se varía el número de pasos por cada haz de 2 a 4 veces, con lo que se obtiene un número de tubos de 270, es decir, 135 tubos por haz.

La configuración de los tubos es aportada por el suministrador, representando disposición a tres bolillos.

Según las normas TEMA la distancia mínima de centro a centro de los tubos en disposición triangular es:

$$D_{min} = 1,25 \cdot D_{ext} \quad (\text{Ec. 39})$$

A continuación se observa la distribución simplificada de los tubos por cada haz, presentando las medidas en cm.

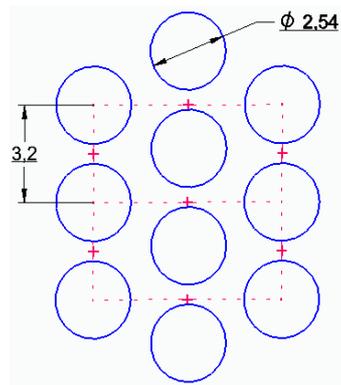


Figura 33: Configuración de tubos a tres bolillos

6.3.3. Filtro de mangas

El dimensionado del filtro de mangas con tecnología Pulse-Jet se basa principalmente en la determinación de dos parámetros críticos, y a su vez estos llevan asociadas otras características a definir no menos importantes (tipo de tela, método de limpieza, etc):

- Velocidad de filtración (relación gas-tela)
- Pérdida de carga

El procedimiento para realizar el diseño se basa en determinar la velocidad de filtración del gas con el propósito de establecer un punto óptimo entre la pérdida de carga y las dimensiones del equipo. Para ello, se suele recurrir a valores típicos que dependen del material particulado y del tamaño de partícula, pero debido a la falta de información disponible respecto a las partículas sólidas que se emiten a consecuencia de la combustión de orujillo se recurre al uso de una serie de ecuaciones y consideraciones tomadas a partir de recomendaciones de la EPA [20].

$$V = 2,878 \cdot A \cdot B \cdot T^{-0,2335} \cdot L^{-0,06021} \cdot (0,7471 + 0,0853 \cdot \ln D) \quad (\text{Ec. 40})$$

Dónde:

- V: Velocidad de filtración (ft/min).
- A: Factor del material (Tabla 54). Se toma A=15
- B: Factor de aplicación (Tabla 54). Se toma B=0,8 (Filtración de gases de proceso)
- T: Temperatura (°F). Para temperaturas superiores a 275° F se usa T=275.
- L: Concentración de polvo de entrada (g/ft³). Para cargas de polvo menores de 0,05 g/ft³ se usa L=0,05.
- D: Diámetro (μm) medio en masa de la partícula (Entre 3-100). Se supone un valor medio de D=30 μm.

Por lo tanto, sustituyendo todos los parámetros previamente comentados en la ecuación anterior se obtiene el valor de la velocidad de filtración.

A	B	T (°F)	L (g/ft ³)	D (μm)	V (ft/min)	V (m/s)
15	0,8	275	0,05	30	12,04	0,059

Tabla 20: Determinación velocidad de filtración,

En primer lugar, una vez determinada la relación gas-tela se establece la relación de este parámetro con el área de filtración a través de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (\text{Ec. 41})$$

Dónde:

- A: Área de filtración (m²).
- V: Velocidad de filtración (m/s).
- Q: Caudal volumétrico de gases de combustión (m³/s).

Se asume un coeficiente de seguridad del 10 % para el área neta de filtración. En relación a este parámetro, se establece el número de compartimientos como se puede observar en la Figura 34.

ÁREA DE LA TELA, M ²	NÚMERO DE COMPARTIMENTOS
1 - 370	2
371 - 1,114	3
1,115 - 2,322	4 - 5
2,323 - 3,715	6 - 7
3,716 - 5,574	8 - 10
5,575 - 7,432	11 - 13
7,433 - 10,219	14 - 16
10,220 - 13,935	17 - 20
> 13,936	> 20

Figura 34: Relación Area-Número de celdas [21].

En segundo lugar, para establecer el número de mangas necesarias en el filtro de mangas es necesario conocer previamente el área de una manga, para ello se toman medidas habituales de mangas comerciales.

$$A_m = \pi \cdot D \cdot L \quad (\text{Ec. 42})$$

En la cual:

- A_m : Área de filtración de una manga (m²).
- D : Diámetro de la manga (m). Se toma un valor de $D=150$ mm.
- L : Longitud de la manga (m). Se toma un valor de $L=2,5$ m [24].

Es recomendable cumplir una relación entre longitud y diámetro de manga, ya que si la longitud de la manga es muy elevada con respecto al diámetro la dificultad de limpieza aumenta, además de que se pueden originar problemas de fricción que disminuirían la vida útil de las mangas. En este sentido las dimensiones seleccionadas cumplen la recomendación propuesta [25].

$$\frac{L}{D} \leq 25 \quad (\text{Ec. 43})$$

Por lo tanto, una vez conocido el área neta de filtración y el área de la manga se puede cuantificar el número de mangas necesarias, y por consiguiente determinar la cantidad de mangas por compartimento.

$$N_{mangas} = \frac{A}{A_m} \quad (\text{Ec. 44})$$

A (m ²)	Celdas	A_m (m ²)	N_{mangas}
52,4	2	1,41	36

Tabla 21: Dimensionado filtro de mangas

El filtro de mangas “Pulse Jet” dimensionado presenta 2 celdas independientes más una adicional con objeto de prevenir posibles paradas por mantenimiento, ya sea por rotura o sustitución de mangas filtrantes, por fallo o rotura de componentes internos, etc.

Por tanto, el área total del filtro de mangas está constituido por las dos celdas de funcionamiento continuo más una adicional de reserva que constituye un área de 26,2 m², necesiándose un área final de aproximadamente 78,6 m².

Por ello, se necesitarán 36 mangas, es decir, 18 mangas para cada celda independiente (sin contar las mangas del compartimento de reserva). Para conseguir una distribución adecuada de las mangas se implantará una matriz 5 x 4, de forma que el número de mangas final por celdas será de 20. El espaciado entre mangas se ha determinado con un margen de seguridad de 2,5 sobre el diámetro de la manga, ya que cada manga está dispuesta

junto con la canastilla que la rodea y eso implica una mayor necesidad de espacio, además si la distancia entre mangas es muy reducida la velocidad ascendente del gas aumenta y perturba los ciclos de limpieza, ya que las partículas descendentes volverían a ascender con el gas perjudicando de forma considerable el rendimiento del equipo. En la siguiente figura se observa la matriz resultante (medidas expresadas en metros).

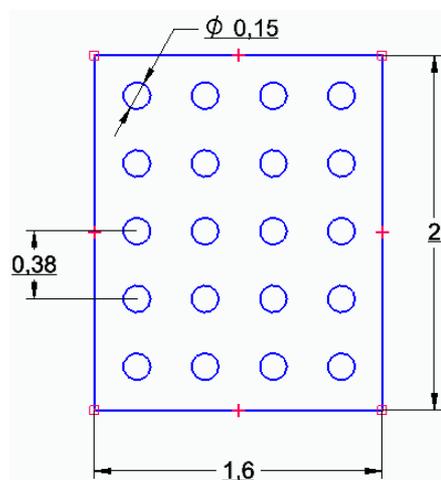


Figura 35: Disposición mangas filtrantes

A continuación, hay que evaluar diferentes características de los diferentes tejidos existentes en el mercado para filtro de mangas, tanto criterios operativos como económicos. Por tanto, en la Figura 36 se pueden observar todas estas características recogidas en una sola tabla.

Tejido	Máxima Temperatura (°C)		Resistencia a ácidos	Resistencia a álcalis	Resistencia a flexión	Costo Relativo
	Sostenida	Puntual				
Algodón	80	110	M	B	B	1
Lana	95	120	MB	M	R	2,75
Nylon	95	120	R	MB	MB	2,5
Dynel	70	115	B a MB	MB	B	3,2
Polipropileno	95	120	MB	MB	MB	1,75
Orlón	125	135	B a MB	R	R	2,75
Dacrón	135	160	B	B	MB	2,8
Nomex	205	260	R	MB	MB	8
Teflón	205	260	MB	MB	R	30
Fibra de vidrio	290	315	R a B	R	M	5,5
Polietileno	95	-	MB	MB	B	2

NOTA: M = mala; R = regular; B = buena; MB = muy buena.

Figura 36: Características mangas filtrantes [8]

Para la elección del tejido adecuado es necesario discutir y evaluar previamente todas las características de mayor a menor importancia:

1. Temperatura: Se trata de la restricción operativa más condicionante. Como se detalló anteriormente los gases de combustión previamente refrigerados bien mediante aerorefrigerador o precalentador de aire, salen a una temperatura continua de 140 °C. Así que dentro de la amplia gama de tejidos solo la fibra de vidrio, teflón y Nomex cumplen con esta especificación (El resto se descarta).
2. Costo relativo: El coste del tejido seleccionado es un factor muy importante desde el punto de vista de costes operacionales, ya que las mangas tienen un periodo de vida limitado y frecuentemente es necesario sustituirlas. Por ello, se descarta el teflón como posible tejido quedando solo fibra de vidrio y nomex como posibilidad real.

3. Resistencia a ácidos y alcalis: Debido a la naturaleza del combustible, este prácticamente se encuentra exento de azufre en su composición, por tanto, el aspecto de condensaciones ácidas no se considera un factor limitante para la tipología de las mangas. En este sentido, ambas presentan características similares.
4. Resistencia a flexión: Como el sistema de limpieza elegido es el de pulsos de aire, las mangas sufrirán menos desgaste ya que no se someterán a esfuerzos importantes como en el caso de otros sistemas de limpieza. En consecuencia, la resistencia a flexión de las mangas tampoco será un factor decisivo de cara a la selección del material.

En conclusión, el tejido seleccionado se trata de la fibra de vidrio ya que presenta unas condiciones operativas muy aptas además de ser la opción más económica dentro de las posibilidades reales.

Por consiguiente, para cerrar el estudio del filtro de mangas es necesario estimar la pérdida de carga que supone la instalación de este equipo en la línea de salida de los gases de combustión.

La caída de presión durante la filtración está formada por dos resistencias principales al flujo como son:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_t \quad (\text{Ec. 45})$$

Dónde:

- ΔP : Pérdida de carga total.
- ΔP_c : Pérdida de carga a través de la capa de polvo.
- ΔP_t : Pérdida de carga a través de la tela.

La determinación de estas resistencias se puede realizar asumiendo el modelo de Darcy en medios porosos, pero debido a la ausencia de ensayos experimentales con este tipo de partículas, se recurre a ecuaciones aportadas por fabricantes de filtros de mangas Pulse-Jet con objeto de estimar de forma aproximada y real la caída de presión. La ecuación se muestra a continuación:

$$\Delta P = 6,08 \cdot V_f \cdot P_p^{-0,65} + K \cdot V_f^2 \cdot C_e \cdot t_f \quad (\text{Ec. 46})$$

Dónde:

- ΔP : Pérdida de carga total del filtro (Pulg H₂O).
- V_f : Velocidad de filtración (ft/min).
- P_p : Presión pulso de limpieza (psi).
- K : Coeficiente de resistencia específico de la partícula (Pulg H₂O).
- C_e : Carga de polvo a la entrada (lb/ft³).
- t_f : Tiempo de filtración (min).

Generalmente el pulso de limpieza se encuentra entre 60-100 psi, por lo que se toma un valor medio de 80 psi para el cálculo de la caída de presión. Además, el tiempo de filtración para esta tipología de filtros continuos se encuentran entre 30-60 min, por lo que se toma 45 min como tiempo de filtración.

En cuanto al coeficiente de resistencia específico de la partícula se encuentran muchos valores entre un rango de 1,2- 20 Pulg H₂O/ft/min-lb/ft². Se considera un valor de $K= 9$ Pulg H₂O/ft/min-lb/ft², ya que se trata de partículas de polvo pequeñas.

Por lo tanto, sustituyendo los valores anteriores en la Ecuación 45 se obtiene un valor de:

ΔP (Pulg H ₂ O)	10,1
ΔP (mm.c.a.)	279

Tabla 22: Pérdida de carga

Se trata de un valor elevado, lo usual es que la caída de presión no supere los 200 mmca, por tanto, se reduce el

tiempo de filtración pasando de 45 a 30 min con objeto de disminuir la caída de presión, obteniéndose un valor final de $\Delta P = 203 \text{ mmca}$ considerándose como valor aceptable. No obstante, la caída de presión es un parámetro que se ajusta mediante un sistema de control automático durante la operación continua del filtro de mangas. Por tanto, solo se trata solo de un valor representativo.

6.3.4. Precipitador electrostático

Dentro de las distintas tipologías de precipitadores electrostáticos se realiza el dimensionado concretamente de un electrofiltro de placas de una etapa dónde la precipitación de partículas tienen lugar en un mismo campo eléctrico, ya que se trata del precipitador más común y predominante en la actualidad.

El procedimiento de diseño del precipitador electrostático se realiza siguiendo una secuencia de pasos que se explican a continuación [22]:

1. Establecer la eficacia de captación. Como se explicó en apartados anteriores la eficacia mínima requerida sería superior al 95% debido a las imposiciones legislativas, por lo que se considera un valor de $\eta_G = 98\%$.
2. Determinar la superficie específica del precipitador haciendo uso del modelo de Deutsch-Anderson.

En este modelo aparece un parámetro conocido como velocidad de migración (w_e), que representa la velocidad terminal de una partícula hacia el electrodo de descarga. Este factor se determina haciendo uso de la Figura 52 dónde se recogen diferentes valores de velocidad de migración para distintas aplicaciones industriales. Se considera una $w_e = 10$ cm/s, ya que dentro de las diferentes posibilidades la más parecida son las cenizas volantes de carbon.

$$\eta_G = 1 - \exp\left(-w_e \cdot \frac{S}{Q}\right) \quad (\text{Ec. 47})$$

Dónde:

- η_G : Eficacia de captación.
- w_e : Velocidad de migración (cm/s).
- S : Superficie de captación (m^2).
- Q : Caudal de gases de combustión (m^3). Se toma $Q = 10080$ m^3/h .

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior y aplicando un margen de seguridad el 10%, se obtiene una superficie específica captura de:

S (m^2)	109,6
----------------------	-------

Tabla 23: Superficie captura

3. Posteriormente, se recurre a una serie de ecuaciones que permiten definir geoméricamente el equipo de captación.

$$S = 2 \cdot N_c \cdot L \cdot H \quad (\text{Ec. 48})$$

$$N_c = \frac{Q}{u \cdot D \cdot H} \quad (\text{Ec. 49})$$

$$L = R \cdot H \quad (\text{Ec. 50})$$

Dónde:

- N_c : Número de calles.
- L : Longitud total activa.
- H : Altura de las placas.
- D : Distancia entre placas.
- u : Velocidad de paso de los gases por el electrofiltro.
- R : Relación de aspecto.

Para la resolución de este sistema de ecuaciones es necesario fijar tres parámetros como son la distancia entre placas, la velocidad de paso y la relación de aspecto. Para ello, se recurre a la Figura 37 dónde se

recogen los valores usuales de los principales factores.

Parámetro	Rango de valores
Velocidad efectiva de migración, w_e	1,5 - 18 cm/s
Anchura de calles, D	150 - 400 mm
Superficie específica de captura, S/Q	15 - 160 m ² /(m ³ /s)
Velocidad del gas, u	1 - 2,5 m/s
Relación de aspecto, R (Longitud/Altura)	0,5 - 2 (superior a 1 para > 99%)
Potencia específica de corona, P _c /Q	100 - 1000 W/(m ³ /s)
Densidad de corriente, I _c /S	5 - 75 nA/cm ²
Densidad de potencia en función de la resistividad:	

Figura 37: Rango de los parámetros de diseño

Así que una vez fijados los valores anteriormente comentados se puede resolver el sistema de ecuaciones dándose los siguientes valores:

D (mm)	u (m/s)	R	H (m)	L (m)	N _C
300	1	1	6	6	2

Tabla 24: Dimensiones precipitador

A continuación, se puede observar la disposición y dimensiones de los electrodos previamente calculados.

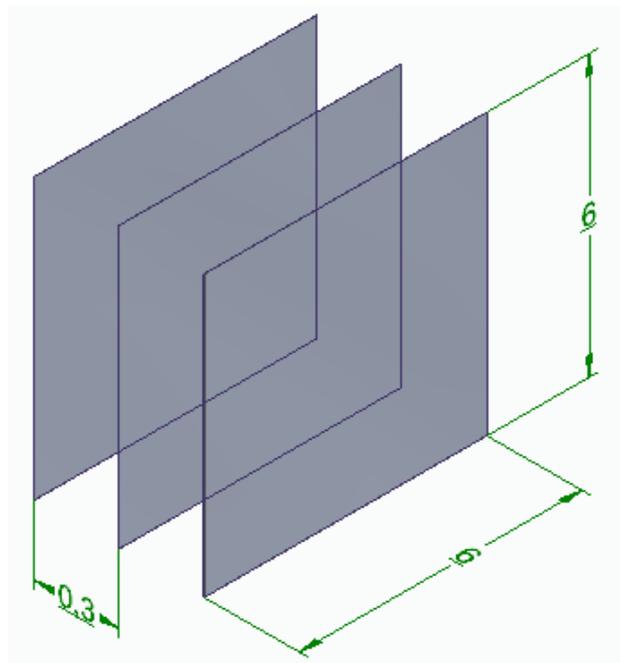


Figura 38: Dimensiones precipitador electrostático

Además, el precipitador electrostático incorpora sistemas eléctricos los cuales hay que determinar como son:

1. Transformador-Rectificador. Sistema eléctrico encargado de suministrar la energía necesaria al electrodo de descarga con objeto de producir una corona. Para ello, se transforma la alimentación de corriente alterna a continua incrementándose el voltaje debido a la acción del transformador. La tensión

de salida del secundario es de 40 kV con una corriente de salida máxima de 30 mA.

2. Sistema de limpieza de placas. El sistema de recolección del polvo acumulado en las placas consiste en un sistema de martillos que mediante impulsos mecánicos y vibraciones desalojan el polvo acumulado en el interior de forma que caiga libremente hacia la tolva de descarga. La actuación de este sistema es controlado automáticamente por medio de programadores de tiempo. Sería conveniente establecer un periodo de limpieza repetitivo cada 10-15 min de funcionamiento.

Por último, se lleva a cabo la estimación de la caída de presión que provoca la instalación del precipitador electrostático en la línea de estudio [20], ya que se debe mantener en un valor aceptable, aunque no es un factor que marque considerablemente el diseño del equipo. La pérdida de carga en este equipo se debe principalmente a cuatro parámetros:

- Deflectores en las placas de recolección. Componentes situados sobre las placas de recolección que protegen las partículas recolectadas con objeto de evitar el arrastre por el flujo de gas.
- Resistencia de la placa plana de recolección contra la circulación de humos. Se basa en la fricción de los gases de combustión a lo largo de las placas planas.
- Transiciones a la entrada-salida del equipo. La pérdida de carga en la entrada se basa en el ensanchamiento gradual y en la salida por una reducción de la sección.
- Placa difusora. La función de este componente es la de igualar el flujo de gas a lo largo del precipitador. Consiste en una placa formada por una serie de orificios circulares generalmente de 6 cm, por donde circulan los humos. La pérdida de carga es función del área abierta que presente la placa.

A continuación, se muestra una tabla donde se recogen los valores habituales de pérdida de carga en el precipitador electrostático.

Parámetro	Pérdida de carga (in H ₂ O)	
	Baja	Alta
Deflectores	0,0006	0,123
Placa plana de recolección	0,0003	0,008
Transiciones entrada	0,07	0,14
Transiciones salida	0,007	0,015
Difusor	0,010	0,09
Total	0,09	0,38

Tabla 25: Pérdida de carga PES

6.4. Análisis económico

En esta sección, tras realizar el dimensionado de los distintos equipos estudiados previamente, se lleva a cabo el estudio económico con el objetivo de determinar el coste de estos equipos y finalmente poder seleccionar aquellos equipos que presenten mejores características tanto desde el punto de vista económico como operativo.

6.4.1. Pre calentador de aire

El coste del pre calentador de aire se obtiene a partir de una gráfica publicada de forma que se puede estimar el coste del equipo en ese año y finalmente llevar a cabo un factor de corrección de tiempo y material que permita obtener un resultado más exacto y actualizado. Los pasos a seguir son:

1. Obtención coste inicial (1998).
2. Aplicar corrección por material.
3. Aplicar corrección por tiempo.

Por lo tanto, caracterizando las especificaciones necesarias para poder hacer uso de la Figura 39 se obtiene el siguiente coste de adquisición para el año 1989.

Intercambiador de calor de placas Plate Heat Exchanger	
Área de transferencia (ft ²)	3509
Coste inicial (\$)	54000
Coste inicial (€)	48429

Tabla 26: Coste pre calentador de aire (1989)

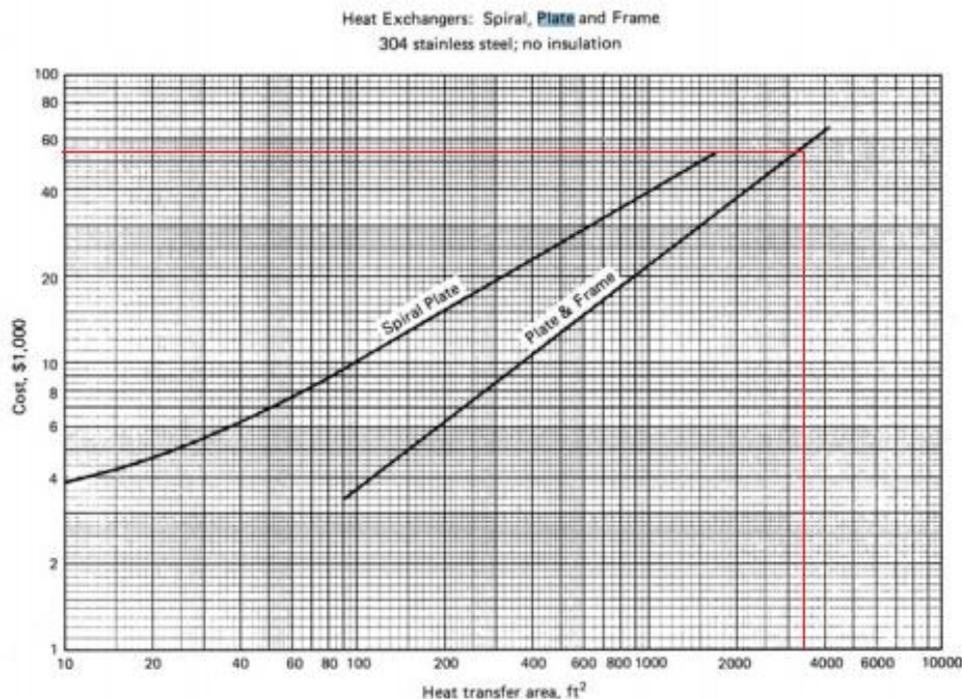


Figura 39: Costes estimados intercambiadores de calor [26]

A continuación, se aplica el factor de corrección de material recomendado. Se aplica un factor de 1,1 ya que se trata de acero 316L

$$C_{1998}(\text{€}) = \text{Coste inicial}(\text{€}) \cdot FM \quad (\text{Ec. 51})$$

Finalmente, se corrige el factor tiempo haciendo uso de los índices de coste de plantas de Ingeniería Química (CEPCI).

$$\frac{C_{1998}}{C_{2018}} = \frac{I_{1998}}{I_{2018}} \quad (\text{Ec. 54})$$

Dónde:

- C_{1998} y I_{1998} : Coste e índice de coste respectivamente del año 1998 [28].
- C_{2018} y I_{2018} : Coste e índice de coste respectivamente del año 2018. Se toma el índice CEPCI de 2018 porque es el último valor anualizado [29].

C_{1998} (€)	53272
I_{1998}	389,5
I_{2018}	603,1
C_{2018} (€)	82486

Tabla 27: Estimación final precalentador

6.4.2. Aerorefrigerador

El coste del aerorefrigerador se determina a partir de información bibliográfica ya que no se disponen de datos económicos aportados por fabricantes de esta tipología de equipos. Por lo tanto, el procedimiento realizado es similar al cálculo del coste del precalentador de aire.

1. Obtención coste inicial (1982).
2. Aplicar corrección por tiempo.

Por lo tanto, caracterizando las especificaciones necesarias para poder hacer uso de Figura 40 se obtiene el siguiente coste de adquisición para el año 1982.

Aerorefrigerador Air-cooled exchangers	
Área de transferencia (ft ²)	4822
Coste inicial (\$)	45000
Coste inicial (€)	40184

Tabla 28: Coste Aerorefrigerador (1982)

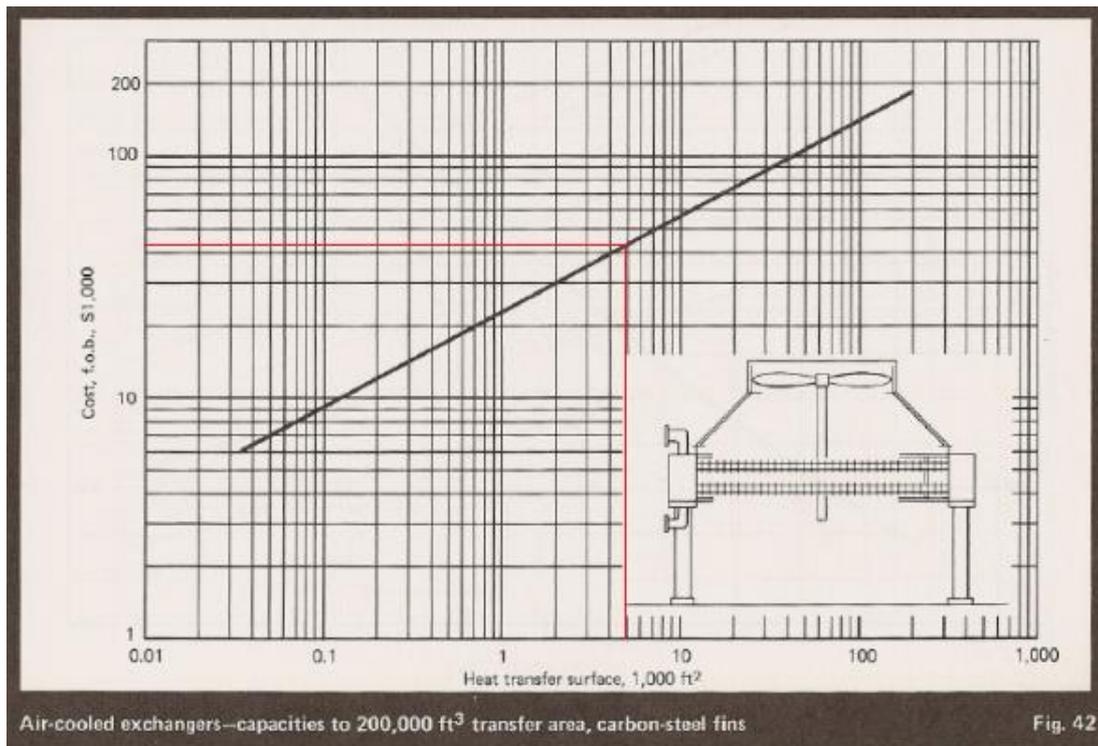


Figura 40: Coste Aerorefrigerador [27]

En último lugar se actualiza el coste calculado previamente mediante los índices CEPCL. A continuación, se muestra la expresión.

$$\frac{C_{1982}}{C_{2018}} = \frac{I_{1982}}{I_{2018}} \quad (\text{Ec. 54})$$

Dónde:

- C_{1982} y I_{1982} : Coste e índice de coste respectivamente del año 1982 [28].

- C_{2018} y I_{2018} : Coste e índice de coste respectivamente del año 2018. Se toma el índice CEPCI de 2018 porque es el último valor anualizado [29].

C_{1982} (€)	40184
I_{1982}	314
I_{2018}	603,1
C_{2018} (€)	77181

Tabla 29: Estimación final Aerorefrigerador

6.4.3. Filtro de mangas

El coste total de la inversión del filtro de mangas se calcula siguiendo las recomendaciones propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [20]. Por consiguiente, se mostrará un presupuesto final dónde se recogen todos los costes asociados a la compra e instalación del filtro de mangas.

Previamente se procede a definir de forma detallada los factores económicos que se han tenido en cuenta.

1. Coste directos de la adquisición del equipo. Este factor a su vez engloba una serie de parámetros como son:

1.1. Coste del filtro de mangas. Se recurre a una serie de ecuaciones ajustadas a partir de precios de vendedores de filtros. Las ecuaciones seleccionadas son de filtros del tipo chorro pulsante (unidad prensamblada). Además, hay que tener en cuenta el tercer compartimento adicional (reserva) que hay que añadir al área resultante:

$$C_{FM} = 13,54 + 8,885 \cdot A_{FM} \quad (\text{Ec. 52})$$

Dónde:

➤ C_{FM} : Coste filtro de mangas (\$).

➤ A_{FM} : Área filtro de mangas (ft²).

$$C_{Acero} = 1,811 + 4,252 \cdot A_{FM} \quad (\text{Ec. 53})$$

$$C_{Ais} = -195 + 2,743 \cdot A_{FM} \quad (\text{Ec. 54})$$

Dónde:

➤ C_{Acero} : Coste adición material-acero inoxidable (\$).

➤ C_{Ais} : Coste adición aislamiento (\$).

1.2. Coste de mangas filtrantes. Las mangas seleccionadas son de fibra de vidrio (FG) de diámetro 5,9 in. (Ver Figura 41)

Forma de Limpieza	Diámetro de Bolsa (pulgadas)	Tipo de Material ^F									
		PE	PP	NO	HA	FG	CO	TF	P8	RT	NX
Chorro Pulsante, TR ^b	4-1/2 to 5-1/8	0.75	0.81	2.17	1.24	1.92	NA	12.21	4.06	2.87	20.66
	6 to 8	0.67	0.72	1.95	1.15	1.60	NA	9.70	3.85	2.62	NA
Chorro Pulsante, BBR	4-1/2 to 5-1/8	0.53	0.53	1.84	0.95	1.69	NA	12.92	3.60	2.42	16.67
	6 to 8	0.50	0.60	1.77	0.98	1.55	NA	9.00	3.51	2.30	NA
Chorro Pulsante, Cartucho ^c	4-7/8	2.95	NA	6.12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	6-1/8	1.53	NA	4.67	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Agitación, Strap top	5	0.63	0.88	1.61	1.03	NA	0.7	NA	NA	NA	NA
Agitación, Loop top	5	0.61	1.01	1.53	1.04	NA	0.59	NA	NA	NA	NA
Aire a la Reversa con anillos	8	0.63	1.52	1.35	NA	1.14	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.62	NA	1.43	NA	1.01	NA	NA	NA	NA	NA
Aire a la Reversa sin anillos	8	0.44	NA	1.39	NA	0.95	NA	NA	NA	NA	NA
	11-1/2	0.44	NA	1.17	NA	0.75	NA	NA	NA	NA	NA

NA = No aplicable.

Figura 41: Coste mangas filtrantes

1.3. Equipos auxiliares. Está formado por sistema de conductos, transportador de tornillo, ventiladores, etc. De forma general, representa un coste importante aproximadamente del 70% del coste total del filtro de mangas.

1.4. Coste jaulas de alambre. Se seleccionan jaulas de acero al carbono de 10 ft de largo y 6 in.

$$C_{jaula} = N_{jaulas} \cdot 4,3080 \cdot A_{FM}^{0,4552} \quad (\text{Ec. 55})$$

Dónde:

➤ C_{jaula} : Costes de jaulas (\$).

➤ N_{jaulas} : Número de jaulas.

La totalidad de los costes previamente explicados se considera como base para el calculo de otros factores económicos. Por tanto:

$$A = C_{FM} + C_{mangas} + C_{auxiliar} + C_{jaulas} \quad (\text{Ec. 56})$$

1.5. Instrumentación. Representa el 10% de la base de cálculo (A).

1.6. Impuestos sobre ventas. Representa el 3% de la base de cálculo.

1.7. Transporte. De la totalidad de A representa el 5%.

La totalidad del coste adquirido del equipo (B) es la suma de todos los factores económicos anteriores, que supone la base de cálculo para la estimación posterior tanto de costes directos como indirectos.

2. Costes directos de la instalación. En la siguiente tabla se observan los valores típicos de cada partida considerada, expresados en tanto por uno del coste adquirido del filtro de mangas (B).

Cimientos y soportes	0,04 · B
Manejo e instalación	0,50 · B
Sistema eléctrico	0,08 · B
Tuberías	0,01 · B
Aislamiento para conductos	0,07 · B
Pintura	0,04 · B

Tabla 30: Costes directos

3. Costes indirectos de la instalación. Se muestran en la siguiente tabla.

Ingeniería	0,10 · B
Gastos de construcción y campo	0,20 · B
Salario del constructor	0,10 · B
Inicio de obra	0,01 · B
Prueba de rendimiento	0,01 · B
Contingencias	0,03 · B

Tabla 31: Costes indirectos

En este estudio económico no se tienen en cuenta una serie de costes derivados de la preparación del emplazamiento para la instalación del equipo o la posibilidad de nuevas edificaciones.

Finalmente, se muestra el presupuesto completo dónde se calcula el coste de inversión del filtro de mangas.

PRESUPUESTO FILTRO DE MANGAS	
COSTES DIRECTOS	
Costes de Adquisición del Equipo	Valor (\$)
Filtro de mangas	7213,9
Acero inoxidable	3486,53
Aislamiento	2028
Mangas filtrantes	1556
Jaulas de alambre	843
Equipos auxiliares	8909,9
Instrumentación	2403,7
Impuestos sobre venta	721,1
Transporte	1201,9
Σ (\$)	28363,8
Costes de Instalación	
Cimientos y Soportes	1134,6
Manejo e Instalación	14181,9
Sistema eléctrico	2269,1
Tuberías	283,6
Aislamiento para conductos	1985,5
Pintura	1134,6
Σ (\$)	20989,2
COSTES INDIRECTOS	
Ingeniería	2836,4
Gastos de construcción	5672,8

Salario del constructor	2836,4
Inicio de obra	283,6
Prueba de rendimiento	283,6
Contingencias	850,9
Σ (\$)	12763,7
INVERSIÓN TOTAL (\$)	62116,8

Tabla 32: Coste inversión filtro de mangas

Por último, es necesario corregir el factor tiempo a través de los índices CEPCI.

$$\frac{C_{1987}}{C_{2018}} = \frac{I_{1987}}{I_{2018}} \quad (\text{Ec. 61})$$

Dónde:

- C_{1987} y I_{1987} : Coste e índice de coste respectivamente del año 1987 [28].
- C_{2018} y I_{2018} : Coste e índice de coste respectivamente del año 2018. Se toma el índice CEPCI de 2018 porque es el último valor anualizado [29].

C_{1987} (\$)	62116,8
I_{1987}	323,8
I_{2018}	603,1
C_{2018} (\$)	115697
C_{2018} (€)	103315

Tabla 33: Coste final filtro de mangas

6.4.4. Precipitador electrostático

La inversión total del filtro de mangas se calcula siguiendo las recomendaciones propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) [20]. Como en la sección anterior, se explican las diferentes partidas que conforman el presupuesto, para concluir con una tabla donde se muestran estas partidas junto con el coste total de la inversión requerida. Por tanto, los costes son los siguientes:

1. Costes directos de la adquisición del equipo. Este factor a su vez engloba una serie de parámetros como son:
 - 1.1. Coste del precipitador electrostático. Para cuantificar esta partida se recurre a ecuaciones ajustadas aportadas por suministradores de estos equipos. La expresión se muestra a continuación:

$$C_{PES} = 614,55 \cdot A_{PES}^{0,6276} \quad (\text{Ec. 57})$$

Dónde:

- C_{PES} : Coste precipitador electrostático (\$).
- A_{PES} : Área precipitador electrostático (ft²).

- 1.2. Equipos auxiliares. En la siguiente tabla se muestra el coste adicional que supone la instalación de estos equipos.

Boquillas a la entrada-salida y placas difusoras	$0,08 \cdot C_{PES}$
Auxiliares a la campana, detectores de nivel	$0,08 \cdot C_{PES}$
Cubiertas contra el clima y accesos a escaleras	$0,08 \cdot C_{PES}$
Soportes estructurales	$0,05 \cdot C_{PES}$
Aislantes	$0,08 \cdot C_{PES}$

Tabla 34: Coste equipos auxiliares.

La totalidad de los costes previamente explicados se considera como base para el cálculo de otros factores económicos. Por tanto:

$$A = C_{PES} + C_{auxiliar} \quad (\text{Ec. 58})$$

- 1.3. Instrumentación. Representa el 10% de la base de cálculo (A).
- 1.4. Impuestos sobre ventas. Representa el 3% de la base de cálculo.
- 1.5. Transporte. De la totalidad de A representa el 5%.

La totalidad del coste adquirido del equipo (B) es la suma de todos los factores económicos anteriores, que supone la base de cálculo para la estimación posterior tanto de costes directos como indirectos.

2. Costes directos de la instalación. En la siguiente tabla se observan los valores típicos de cada partida considerada, expresados en tanto por uno del coste adquirido del filtro de mangas (B).

Cimientos y soportes	$0,04 \cdot B$
Manejo e instalación	$0,50 \cdot B$
Sistema eléctrico	$0,08 \cdot B$
Tuberías	$0,01 \cdot B$
Aislamiento para conductos	$0,02 \cdot B$

Pintura	$0,02 \cdot B$
---------	----------------

Tabla 35: Costes directos

3. Costes indirectos de la instalación. Se muestran en la siguiente tabla.

Ingeniería	$0,20 \cdot B$
Gastos de construcción y campo	$0,20 \cdot B$
Salario del constructor	$0,10 \cdot B$
Inicio de obra	$0,01 \cdot B$
Prueba de rendimiento	$0,01 \cdot B$
Contingencias	$0,03 \cdot B$

Tabla 36: Costes indirectos

En este estudio económico no se tienen en cuenta una serie de costes derivados de la preparación del emplazamiento para la instalación del equipo o la posibilidad de nuevas edificaciones.

Para finalizar, se muestra el presupuesto completo dónde se proporciona el coste de inversión del filtro de mangas.

PRESUPUESTO PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	
COSTES DIRECTOS	
Costes de Adquisición del Equipo	Valor (\$)
Precipitador Electrostático	52056
Equipos auxiliares	19260,7
Instrumentación	7131,7
Impuestos sobre venta	2139,5
Transporte	3565,8
Σ (\$)	84153,6
Costes de Instalación	
Cimientos y Soportes	3366,1
Manejo e Instalación	42076,8
Sistema eléctrico	6732,3

Tuberías	841,5
Aislamiento para conductos	1683,1
Pintura	1683,1
Σ (\$)	56382,9
COSTES INDIRECTOS	
Ingeniería	16830,7
Gastos de construcción	16830,7
Salario del constructor	8415,4
Inicio de obra	841,5
Prueba de rendimiento	841,5
Contingencias	2524,6
Σ (\$)	46284,5
INVERSIÓN TOTAL (\$)	
	186821,1

Tabla 37: Coste inversión Precipitador electrostático

Por último, es necesario corregir el factor tiempo a través de los índices CEPCI.

$$\frac{C_{1987}}{C_{2018}} = \frac{I_{1987}}{I_{2018}} \quad (\text{Ec. 59})$$

Dónde:

- C_{1987} y I_{1987} : Coste e índice de coste respectivamente del año 1987 [28].
- C_{2018} y I_{2018} : Coste e índice de coste respectivamente del año 2018. Se toma el índice CEPCI de 2018 porque es el último valor anualizado [29].

C_{1987} (\$)	186821,1
I_{1987}	323,8
I_{2018}	603,1
C_{2018} (\$)	347967,3
C_{2018} (€)	310839

Tabla 38: Coste final Precipitador electrostático

7 SELECCIÓN FINAL DE ALTERNATIVAS

En esta sección se realiza la discusión y el análisis de resultados obtenidos en apartados anteriores con objeto de seleccionar las opciones más adecuadas desde un punto de vista tanto técnico como económico. En primer lugar, se realiza la comparativa entre los dos equipos de reducción de temperatura de gases de combustión (precalentador de aire-aerorefrigerador). Luego, se discute la opción más válida entre los equipos captadores de partículas (filto de mangas-precipitador electrostático).

7.1. Reducción temperatura

En este apartado se evalúan tanto precalentador de aire como aerorefrigerador como posibles alternativas de cara al enfriamiento de la corriente de gases de combustión.

Los criterios de selección que se han tenido en cuenta para la elección del equipo más adecuado son los siguientes:

1. Costes de inversión. A continuación, se muestra una tabla comparativa donde se puede observar la diferencia de los costes de inversión de cada equipo determinado en apartados anteriores y el sobrecoste del equipo más caro respecto al más económico.

	Precalentador de aire	Aerorefrigerador
Coste de inversión (€)	82486	77181
Sobrecoste precalentador (%)	7	

Tabla 39: Comparación costes de inversión

2. Espacio requerido. Otro aspecto importante que considerar es el área requerida por el equipo en la planta, este se evalúa en función de la superficie de intercambio.

	Precalentador de aire	Aerorefrigerador
Superficie de intercambio (m ²)	326	448

Tabla 40: Espacio requerido

3. Ahorro combustible. La utilización del precalentador de aire supondría un ahorro del 15% de combustible anualmente, y más concretamente 261539 kg de orujillo.
4. Consumo eléctrico. Los consumos eléctricos del aerorefrigerador son mucho mayores que los del precalentador de aire debido a la necesidad de inducir un gran volumen de aire a través de 4 ventiladores, lo que eleva considerablemente los costes energéticos de la instalación.

Finalmente, evaluando todos y cada uno de los parámetros se considera el precalentador de aire como el equipo más adecuado, ya que presenta numerosas ventajas como menor necesidad de espacio, importante ahorro de combustible y aprovechamiento energético, y menor consumo eléctrico, además el coste de inversión de ambos equipos es similar.

7.2. Captación de partículas

En este apartado se evalúan tanto filtro de mangas como precipitador electrostático como posibles alternativas para la filtración de gases de combustión.

Los criterios de selección que se han tenido en cuenta para la elección final del equipo más adecuado son los siguientes:

1. Costes de inversión. A continuación, se muestra una tabla comparativa donde se puede observar la diferencia de los costes de inversión de cada equipo determinado en apartados anteriores y el sobrecoste del equipo más caro respecto al más económico.

	Filtro de mangas	Precipitador electrostático
Coste de inversión (€)	103315	310839
Sobrecoste precipitador (%)	200%	

Tabla 41: Comparación costes de inversión

2. Espacio requerido. Otro aspecto importante que considerar es el área requerida por el equipo en la planta, este se evalúa en función de la superficie de captación necesaria.

	Filtro de mangas	Precipitador electrostático
Superficie de intercambio (m ²)	52,4	109,6

Tabla 42: Espacio requerido

3. Flexibilidad operativa. El filtro de mangas tiene la ventaja de que es un equipo que puede trabajar con posibles variaciones operativas (caudal, concentración de partículas, etc). En cambio, el precipitador electrostático no es un equipo versátil en ese sentido y no opera bien bajo condiciones diferentes a las de diseño.

En conclusión, se selecciona definitivamente el filtro de mangas como equipo de captación de partículas ya que presenta numerosas ventajas en detrimento del precipitador electrostático como se puede observar, ya que se trata principalmente de una inversión mucho menor, además de menor requerimiento de espacio y posibilidad de adaptación ante posibles cambios operativos.

8 HOJA DE ESPECIFICACIONES

En esta sección, se presentan las hojas de especificaciones de los equipos seleccionados de forma definitiva en la sección anterior mostrando las características técnicas y operativas de cada uno de ellos recogidas en diferentes tablas.

8.1. Precalentador de aire

PRECALENTADOR DE AIRE		
Proyecto: Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo		
Fecha: 19/06/19		
Hoja: 1/2		
Características Generales		
Función: Calentamiento corriente aire (17)- Enfriamiento gases de combustión (6)		
Tipología: Intercambiador de placas		
Línea: 6-7	Nomenclatura: HX-101	Material: Acero al carbono
Características Operativas		
Fluido	Gases de combustión	Aire
Flujo másico (kg/h)	13893,4	8247,6
Temperatura de entrada (°C)	311	25
Temperatura de salida (°C)	165	270
Presión de entrada (atm)	1	1
Densidad (kg/m ³)	1,1	0,95
Pérdida de carga (mmca)	174	-
Condiciones de Diseño		
Disposición de fluidos	Contracorriente	
Número de pasos aire por intercambiador	1	
Número de pasos gases por intercambiador	1	
Calor intercambiado (kW)	580,4	

PRECALENTADOR DE AIRE	
Proyecto: Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo	
Fecha: 19/06/19	
Hoja: 2/2	
Coeficiente Global de transferencia (W/m ² ·K)	25
Área de transferencia (m ²)	326
Características de placas	
Modelo	FP 112-6/10/16/25
Número de placas	292
Material de placas	AISI 316 L
Presión máxima diseño (bar)	25
Superficie de placa (m ²)	1,12
Ancho placa (mm)	620
Largo placa (mm)	2687
Conexiones	DN 150

Tabla 43: Hoja de especificaciones Precalentador de aire

8.2. Filtro de mangas

FILTRO DE MANGAS		
Proyecto: Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo		
Fecha: 19/06/19		
Hoja: 1/2		
Características Generales		
Función: Depuración de gases de combustión (7)		
Tipología: Filtro de mangas 'Pulse Jet'		
Línea: 7-8	Nomenclatura: FM-101	Material: Acero inoxidable
Características Operativas		
Tipo de fluido circulante	Gases de combustión	
Densidad (kg/m ³)	1,1	
Flujo volumétrico (m ³ /h)	10080	
Temperatura de entrada (°C)	140	
Presión de entrada (atm)	1	
Pérdida de carga (mmca)	203	
Operación	Continua	
Condiciones de Diseño		
Velocidad de filtración (m/s)	0,059	
Área de captación/total(m ²)	52,4 (78,6)	
Número de compartimentos	2 (+1)	
Dimensiones de la base de la carcasa (m ²)	1,6 x 2	
Características de mangas filtrantes		
Longitud de mangas (m)	3	
Diámetro de mangas (mm)	150	
Área de mangas filtrantes (m ²)	1,41	

FILTRO DE MANGAS	
Proyecto: Análisis de alternativas para depuración de partículas en los gases de combustión de una caldera de orujillo	
Fecha: 19/06/19	
Hoja: 2/2	
Número de mangas (por compartimiento)	40 (20)
Separación entre mangas (mm)	380
Tejido	Fibra de vidrio
Temperatura máxima puntual por la manga (°C)	315
Temperatura máxima sostenida por la manga (°C)	290
Sistema de limpieza	
Tipología	Pulsos de aire comprimido
Presión de pulso (psi)	80
Tiempo de filtración (min)	30

Tabla 44: Hoja de especificación Filtro de mangas

9 DISEÑO FINAL

Una vez seleccionado el filtro de mangas como equipo de captación de partículas de los gases de combustión procedentes de la caldera de vapor, es necesario realizar el diseño y caracterización de los equipos auxiliares necesarios para el almacenamiento y transporte de las partículas captadas por el filtro de mangas con objeto de completar y cerrar el estudio propuesto.

9.1. Tolva filtro de mangas

Para completar el diseño propio del filtro de mangas es necesario dimensionar la tolva de almacenamiento de partículas captadas por el filtro. Como el filtro de mangas está dividido en tres compartimentos, de los cuales dos operan siempre en continuo, es necesario dimensionar 3 tolvas, todas de las mismas dimensiones y características. A continuación, se explica el procedimiento de resolución.

1. Selección geometría de la tolva. Se elige una tolva con geometría troncopiramidal.
2. Dimensiones tolva. En la Figura 42 se pueden observar las medidas a especificar para completar el diseño de la tolva.

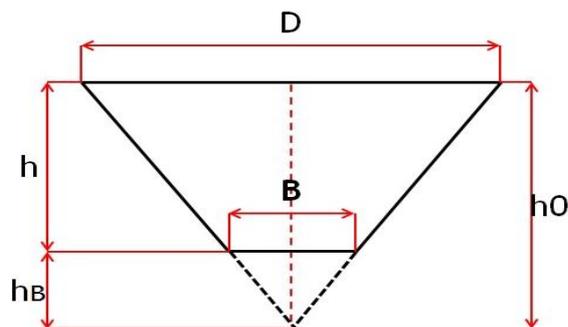


Figura 42: Dimensiones tolva [30]

En primer lugar, se fijan las magnitudes D y B , además de seleccionar el ángulo de diseño de la tolva. Para ello:

- 2.1. Elegir tipo de material y ángulo de fricción (Φ). Se considera cemento en polvo como el material más similar a las características de las partículas recolectadas por el filtro de mangas debido a la ausencia de información de este tipo de material. En relación al ángulo de fricción, considerando chapa de acero se obtiene un rango entre $\Phi = 26^\circ$ - 28° .

Producto	Peso específico (en montón)	Talud natural	ANGULO DE ROZAMIENTO	
			Madera u hormigón	Chapa de acero
Maíz	0,7 ÷ 0,8	28 ÷ 34	22 ÷ 30	20 ÷ 28
Trigo	0,75 ÷ 0,85	25 ÷ 30	24 ÷ 28	20 ÷ 25
Arroz	0,7 ÷ 0,75	27 ÷ 32	25 ÷ 30	20 ÷ 28
Centeno	0,7 ÷ 0,8	28 ÷ 34	25 ÷ 30	20 ÷ 28
Avena... ..	0,5 ÷ 0,6	28 ÷ 34	25 ÷ 30	20 ÷ 28
Harina de cereal ...	0,5 ÷ 0,6	60	70	68
Remolacha	0,6 ÷ 0,75	35 ÷ 45	30 ÷ 43	30 ÷ 43
Azúcar refinado ...	0,7 ÷ 0,9	35 ÷ 50	35 ÷ 50	35 ÷ 45
Carbón vegetal... ..	0,3 ÷ 0,4	40 ÷ 50	40 ÷ 50	38 ÷ 45
Lignito	0,7 ÷ 0,8	35 ÷ 50	35 ÷ 50	32 ÷ 45
Coque	0,4 ÷ 0,5	35 ÷ 50	35 ÷ 50	32 ÷ 45
Tierra seca	1,4 ÷ 1,6	35 ÷ 45	35 ÷ 45	35 ÷ 42
Arena seca	1,6 ÷ 1,7	30 ÷ 35	30 ÷ 35	30 ÷ 32
Arena húmeda	1,8	40 ÷ 45	40 ÷ 45	40 ÷ 42
Piedra caliza troceada ...	1,6 ÷ 2	35 ÷ 45	32 ÷ 42	30 ÷ 40
Cal viva troceada...	0,9 ÷ 1,3	30 ÷ 45	30 ÷ 45	30 ÷ 42
Cemento en polvo.	1,2 ÷ 1,4	20 ÷ 25	28 ÷ 30	26 ÷ 28

Figura 43: Características diferentes productos-diseño de tolvas

2.2. Fijar ángulo de diseño según geometría y ángulo de fricción con objeto de garantizar el flujo en masa. Se considera finalmente un ángulo de diseño de 27°.

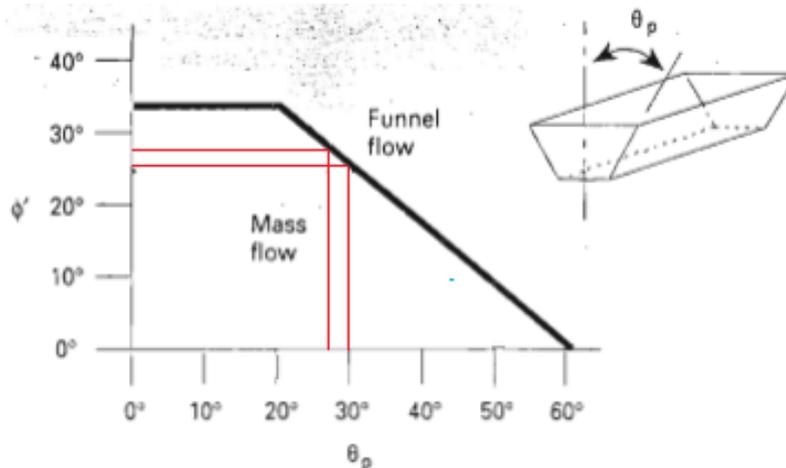


Figura 44: Ángulos de diseño tolva troncopiramidal

Una vez fijadas dichas magnitudes, es posible determinar la altura de la tolva haciendo uso de las siguientes expresiones.

$$h_o = \frac{D}{(2 \cdot \tan \theta)} \quad (\text{Ec. 60})$$

$$h_B = \frac{B}{(2 \cdot \tan \theta)} \quad (\text{Ec. 61})$$

$$h = h_o - h_B \quad (\text{Ec. 62})$$

3. Capacidad de la tolva

$$V = \frac{h}{3} \cdot (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2}) \quad (\text{Ec. 63})$$

Dónde:

- A₁: Sección rectangular de la cara superior de la tolva troncopiramidal.
- A₂: Sección rectangular de la cara inferior de la tolva troncopiramidal

DIMENSIONES TOLVA DE FILTRO DE MANGAS						
D (m)	B(m)	θ (°)	h_o (m)	h_B (m)	h (m)	V (m ³)
1,6	0,5	27	1,57	0,49	1,1	2,2

Tabla 45: Dimensiones tolva

9.2. Válvula rotativa

El principio de funcionamiento de las válvulas rotativas consiste en el movimiento rotacional de la cámara del rotor con el propósito de retirar el material procedente de la tolva descargándolo por la abertura inferior de la válvula rotativa. La instalación de esta válvula permite regular el caudal de descarga del producto.

Al igual que en el apartado anterior, es necesario disponer de tres válvulas rotativas, una para cada compartimento independiente.

Para la selección de la válvula rotativa se ha recurrido a catálogos de fabricantes y se ha elegido concretamente una válvula rotativa tipo SRVP, ideal para descarga y dosificación de productos pulverulentos con riesgo de explosión.



Figura 45: Válvula rotativa [31]

A continuación, se muestran las principales características técnicas.

V/Vuelta	7,8 dm ³
Máximas rpm	24 rpm
Peso	165 kg
Conexiones entrada/salida	Ø 200mm

Tabla 46: Características valvula rotativa

Para determinar el caudal de salida de la válvula, es necesario fijar en primer lugar el número de revoluciones por minuto. Se considera un valor de 20 rpm (inferior al límite), por lo tanto, el caudal volumétrico de descarga sería de 9,4 m³/h.

La operación de la válvula rotativa no es continua, sino todo lo contrario, se programa una actuación discontinua, por lo tanto, es necesario explicar la secuenciación de pasos.

1. Las válvulas rotativas se mantienen inicialmente cerradas mientras las tolvas de almacenamiento se van cargando de material particulado.
2. Una vez que la tolva 1, alcance un llenado del 70% de su capacidad, se producirá una señal mediante un controlador de nivel hacia la válvula rotativa, momento a partir del cual, empieza a descargar el material de la tolva.
3. Cuando la tolva 1 se vacíe completamente, se produce el cierre de la válvula.
4. A partir de ese instante, se produce la actuación de la válvula rotativa del segundo compartimento, la cual descarga el material contenido en las tolvas en las mismas condiciones operativas.
5. Una vez terminada la extracción, se cierra la válvula del compartimento 2.

Finalmente, se determina el tiempo aproximado que tardaría la tolva en alcanzar el volumen previamente definido y entre en funcionamiento la válvula rotativa.

En primer lugar, se establece la carga de partículas mediante los datos de emisión aportados por ATISAE. En la tercera columna, se aplica la eficacia de captura del filtro de mangas (98,5 %), por tanto, se determina la cantidad de partículas recogidas en la tolva por hora.

		Recolección tolva (kg/h)
Emisión de partículas máxima (kg/h)	17,01	16,75
Emisión de partículas mínima (kg/h)	9,97	9,82

Tabla 47: Resultados de emisión muestreados

Para la determinación del tiempo que tarda la tolva en alcanzar el 70% de su capacidad se aplica la siguiente ecuación.

$$t = \frac{0,7 \cdot V \cdot \rho}{F \cdot 24} \quad (\text{Ec. 64})$$

Dónde:

- t : Tiempo para alcanzar el 70 % de la capacidad total de la tolva (días).
- V : Capacidad total de la tolva (m^3). Ver Tabla 45.
- ρ : Densidad del material almacenado (kg/m^3). Se considera $\rho=900 \text{ kg}/\text{m}^3$.
- F : Flujo másico relleno de tolva (kg/h). Ver Tabla 47.

Así que, despejando los valores necesarios en la ecuación anterior se obtiene un rango entre:

Tiempo a emisión máxima (días)	3,4
Tiempo a emisión mínima (días)	5,8

Tabla 48: Tiempo actuación válvula rotativa

9.3. Tornillo sin fin

En este apartado se procede al dimensionado del equipo de transporte de las partículas descargadas por la válvula rotativa que permita cumplir con las necesidades de transporte. El procedimiento de diseño del tornillo sin fin se ha realizado en una secuencia de pasos que se explicarán con detalle a continuación.

1. Selección tipología tornilo. El tornillo seleccionado es de hélice continua, de paso igual al diámetro, es el tipo de tornillo más frecuente y habitual para el transporte de sólidos.
2. Selección clase y factor del material. Para ello se recurre a la Tabla 49, debido a la ausencia de información respecto a las partículas de orujillo, se selecciona como el material más semejante a las cenizas, pertenecientes a la clase C y cuyo factor de capacidad se encuentra entre 2-2,5.

Clase a (F = 1,2)	Clase b (F = 1,4 a 1,8)	Clase c (F = 2 a 2,5)	Clase d (F = 3 a 4)
Cebada † Malta seca en granos Carbón pulverizado Harina de maíz † Harina de semilla de algodón	Alumbre, fino Sosa † Carbón, finos y sueltos Semillas de Cacao † Semillas de café * †	Alumbre aserronado † Bórax Malta mojada en granos Carbón de madera Carbón de hulla clasificado Carbón de lignito Cacao † Corcho en trozos Cenizas Cal apagada Leche seca † Pulpa de papel Papel en bloques Sal, gruesa o fina † Fangos, aguas fecales Jabón pulverizado Cenizas de sosa Almidón † Azúcar refinado	Bauxita Harina de huesos Negro de humo Cemento Creta Arcilla Espato fluor Yeso machacado Oxidos de plomo Guijarros de cal Polvo de piedra caliza Fosfato ácido, de calcio en terrones, 7% humedad. Arena seca Pizarra machacada Esquistos machacados Azúcar crudo Azufre Oxido de zinc

Tabla 49: Factores de capacidad de tornillos sin fin

3. La disposición del tornillo es completamente horizontal sin inclinación con objeto de mejorar el transporte de los sólidos, por lo tanto, no es necesario calcular un caudal teórico de diseño que lleve asumido una reducción de capacidad provocada por la inclinación del tornillo.
4. A continuación, se procede a determinar los posibles diámetros del tronilo sin fin que cumple con las especificaciones solicitadas. Para ello, se hace uso de la siguiente figura partiendo del caudal de sólidos transportados, definido previamente por la válvula rotativa, que es de 9,4 m³/h.

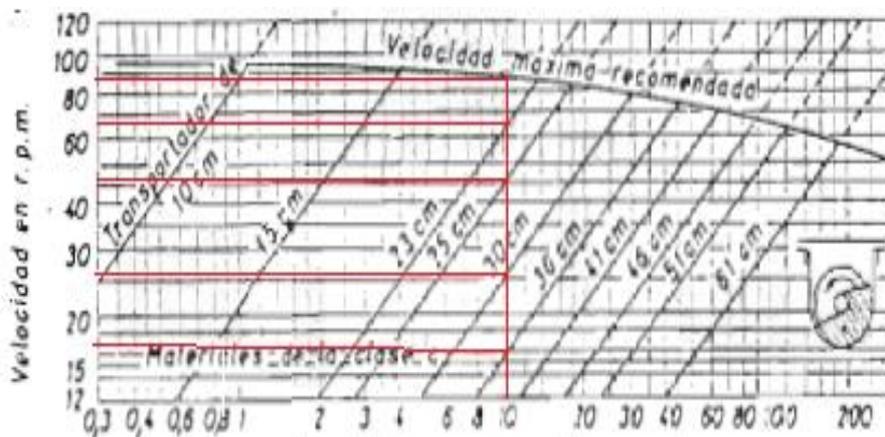


Figura 46: Curvas de velocidad-capacidad materiales clase C

Se recomienda que la velocidad de giro del tornillo en operación esté comprendida entre un 40-60% de la

velocidad máxima recomendable, en este caso, la velocidad máxima es de 90 rpm.

Diámetro (cm)	Velocidad de giro (rpm)	Relación V/V _{MAX} (%)
36	18	20
30	26	30
25	46	51
23	68	76

Tabla 50: Resultados diseño tornillo sin-fin

Como se puede observar en la tabla, el único diámetro que cumple el criterio de selección es D=25 cm.

5. Finalmente, se calcula la potencia del motor del tornillo mediante la siguiente expresión simplificada, ya que no se tiene en cuenta el termino de la altura alcanzada, ya que se trata de un tornillo horizontal.

$$P = \frac{F \cdot L \cdot \dot{m}}{270 \cdot \zeta} \quad (\text{Ec. 65})$$

Dónde:

- P: Potencia tornillo sin fin (CV).
- F: Factor de capacidad del material. Se toma F=2,5.
- L: Longitud del tornillo (m). Se toma una longitud de 3 metros.
- \dot{m} : Flujo másico (t/h). Para su determinación es necesario la densidad del material, se toma una densidad parecida a las cenizas volantes de un valor de $\rho=0,9 \text{ t/m}^3$ [32].
- ζ : Rendimiento del tornillo sin fin. Se considera un rendimiento del 30%.

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior, se obtiene una potencia de P= 0,78 CV.

La actuación del tornillo sin fin no es continua, al igual que la válvula, opera de forma discontinua cada ciertos intervalos de tiempo previamente definidos.

9.4. Elevador de cangilones

En este apartado se realiza el diseño del elevador de cangilones, cuya función es elevar el producto transportado por el tornillo sin fin hasta el silo de almacenamiento. El funcionamiento del elevador de cangilones al igual que el tornillo sin fin será de actuación discontinua. A continuación, se procede a dimensionar el elevador de cangilones siguiendo el siguiente procedimiento.

Las características del material a transportar son:

- Baja-mediana abrasividad.
- Producto pulverulento.
- Producto húmedo-apemazable.

Por lo tanto, como se puede observar en la Tabla 51 se selecciona el elevador de cangilones tipo descarga por gravedad. Así que, para el posterior cálculo del tamaño del equipo se considera un coeficiente de llenado medio de 0,5 y una velocidad entre 0,6- 0,8 m/s.

Características del material	Tipo de elevador	Coefficiente de llenado	Velocidad (m/seg)
<ul style="list-style-type: none"> - Baja granulometría (< 50 mm) - Baja abrasividad - No apelmazables 	Descarga centrífuga	0,6-0,8	1 -1,5
<ul style="list-style-type: none"> - Baja granulometría (< 50 mm) - Acusada abrasividad - Interesa conservar granulometría 			
<ul style="list-style-type: none"> - Alta abrasividad - Grandes tonelajes 	Descarga central	0,5-0,7	0,4-0,6
<ul style="list-style-type: none"> - Alta abrasividad - Alta granulometría (~ 100 mm) 	Elevadores de celdas	0,5-0,7	0,3-0,4
<ul style="list-style-type: none"> - Baja o mediana abrasividad - Pulverulento o granulares, húmedos-apelmazables 	Descarga por gravedad	0,4-0,6	0,6-0,8

Tabla 51: Tipos de elevadores de cangilones

A continuación, se determina el caudal a 100% teniendo en cuenta el coeficiente de llenado.

$$Q_{100\%} = \frac{9,4}{0,5} = 18,8 \frac{m^3}{h} \quad (\text{Ec. 66})$$

Posteriormente, es necesario determinar el tamaño del cangilón mediante la Figura 47.

Capacidad al 100 % (m ³ /h)	Capacidad al 70 % (m ³ /h)	Capacidad de un cangilón (l)	Distancia entre cangilones (mm)	Velocidad (m/seg)
6	4,2	1	350	0,6
9	6,3	2,4	567	0,6
14	9,8	3,7	567	0,6
26	18,2	6	570	0,7
40	28	9	570	0,7
58	40,6	15	631	0,7
85	59,5	25	742	0,7
108	75,6	36,5	861	0,7

Figura 47: Datos elevadores de descarga por gravedad

CARACTERÍSTICAS ELEVADOR DE CANGILONES	
Capacidad cangilón (L)	6
Distancia entre cangilones (mm)	570
Velocidad (m/s)	0,7

Tabla 52: Características de diseño elevador de cangilones

Una vez definidas las características del equipo es necesario comprobar si el cangilón seleccionado cumple con las especificaciones de capacidad de llenado:

$$\dot{m} = 3,6 \cdot \frac{C \cdot \rho \cdot v \cdot \varphi_{llenado}}{d} \quad (\text{Ec. 67})$$

Dónde:

- \dot{m} : Flujo másico de material (t/h). Igual que el flujo utilizado en el tornillo sin fin.
- C : Capacidad cangilón (L). Ver Tabla 52.
- d : Distancia entre cangilones (m). Ver Tabla 52.
- v : Velocidad de transporte (m/s). Ver Tabla 52.
- $\varphi_{llenado}$: Coeficiente de llenado

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación anterior, se obtiene un valor de $\varphi_{llenado} = 0,43$. Debido a que el coeficiente de llenado definido anteriormente en las especificaciones (0,5) es mayor que el calculado previamente, se puede asegurar como válido el diseño del elevador de cangilones para los requerimientos operativos solicitados.

Finalmente, se calcula la potencia del equipo mediante la siguiente ecuación.

$$P = \frac{\dot{m} \cdot H}{125} \quad (\text{Ec. 68})$$

Dónde:

- P : Potencia elevador de cangilones (CV).
- \dot{m} : Flujo másico de material (t/h).
- H : Altura del elevador de cangilones. Viene determinada por la altura del silo, se toma un valor de altura de 4 metros.

Así que, despejando en la ecuación anterior se obtiene un valor de $P = 0,27$ CV.

9.5. Silo de almacenamiento

En este apartado, se pretende dimensionar el silo de almacenamiento del material particulado proveniente del elevador de cangilones. El procedimiento de diseño será similar al diseño de la tolva del filtro de mangas diseñada en apartados anteriores. Por tanto, el procedimiento de diseño consiste en los siguientes pasos.

1. Fijar dimensiones silo. Para ello, se utiliza una relación de $H/D=2$. Por tanto, se fija una altura de 3 metros, y en consecuencia, la longitud del silo sería de 1,5 metros. Y para cerrar las dimensiones del equipo, se toma un ancho(W) del silo de 2 metros.

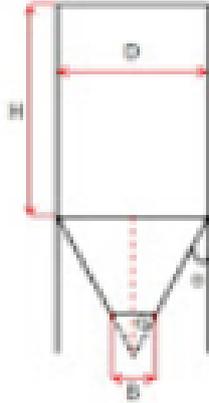


Figura 48: Dimensionado silo

2. Diseño tolva del silo. En primer lugar, la tolva es de geometría tronco piramidal por lo que la caracterización de las dimensiones de esta se realiza según el procedimiento de resolución mostrado en el apartado 8.1. A continuación, se muestra una tabla dónde se recogen las principales dimensiones de la tolva.

DIMENSIONES TOLVA SILO DE ALMACENAMIENTO						
D (m)	B(m)	θ (°)	h_o (m)	h_B (m)	h (m)	V (m ³)
1,5	0,5	27	1,47	0,5	0,97	1,85

Tabla 53: Diseño tolva silo

3. Finalmente, se determina la capacidad total del silo de almacenamiento a partir de la siguiente expresión.

$$V = V_{tolva} + A_1 \cdot H \quad (\text{Ec. 69})$$

Sustituyendo, se obtiene una capacidad total de 10,85 m³.

A modo de conclusión, se presenta en la siguiente página el diagrama de proceso completo de la línea de estudio de la instalación con el conjunto de todos los equipos y corrientes.

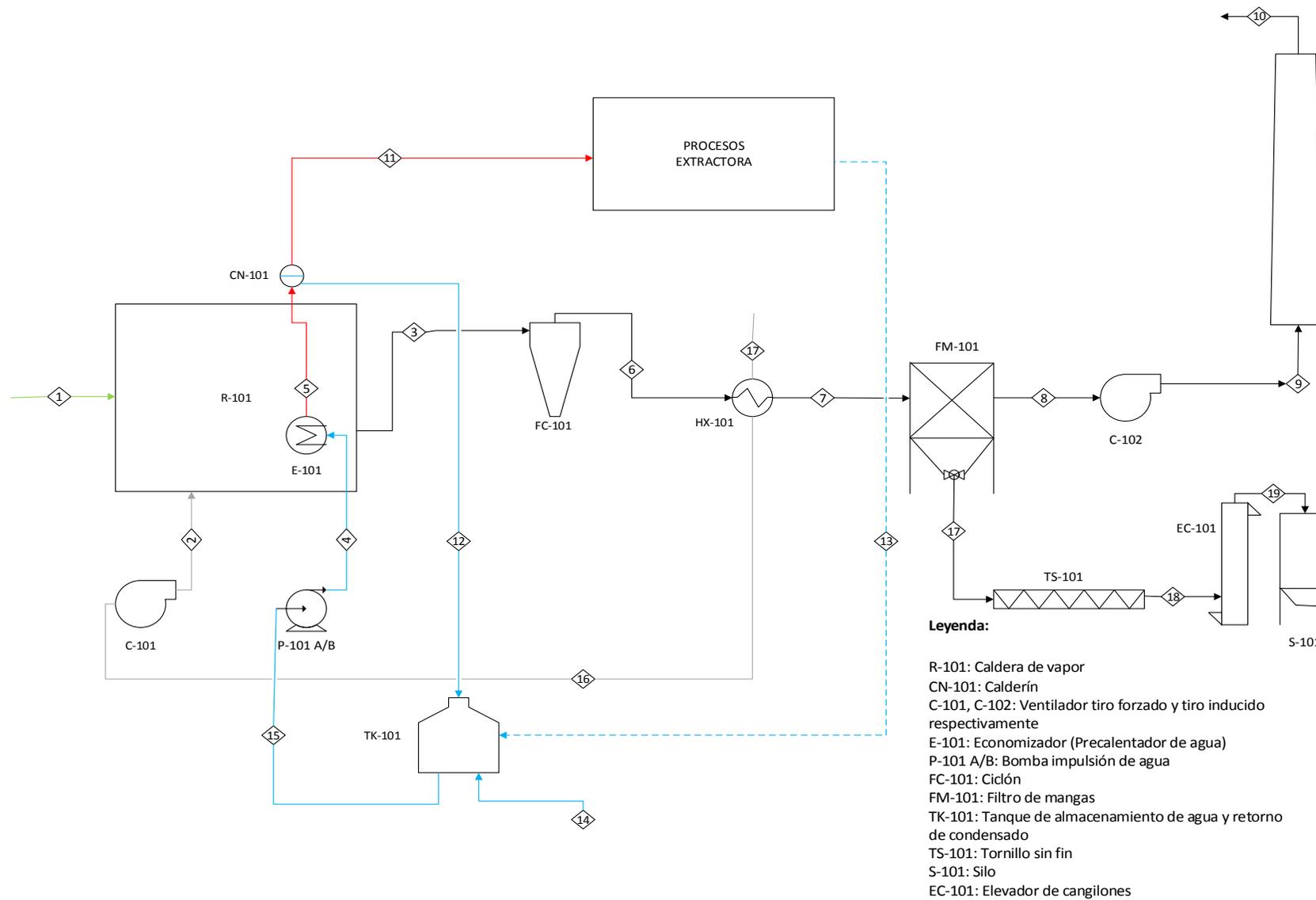


Figura 49: Diagrama de procesos completo

10 CONCLUSIÓN

A modo de conclusión, una vez analizado previamente la gran variedad de equipos y diferentes tecnologías existentes en la actualidad de acuerdo al control de partículas, finalmente se ha seleccionado y dimensionado el filtro de mangas como el equipo de control más adecuado desde un punto de vista tanto técnico como económico para la planta extractora de orujo, descartando otras tecnologías de captura como el precipitador electrostático.

Por lo tanto, estas medidas de control que se han propuesto junto con la necesaria implementación y diseño de otros equipos como precalentador de aire, transportadores de partículas (tornillo sin-fin o elevador de cangilones) y otros, representan globalmente la propuesta de mejora de la instalación, con objeto de cumplir la legislación vigente en materia medioambiental y, por tanto, alargar la vida de explotación de la planta extractora de orujo en cuestión.

Anexo 1: Precalentador de aire

frame/ pressure rating	max. number of plates	surface/ plate m ²	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	L 2 mm	PP mm	connec- tions	max. surface m ²
FP 04-16	125	0.04	460	160	336	65	85	150-600	pcs.x 2.4	1"	5
FP 08-16	150	0.08	799	160	675	65	85	150-600	pcs.x 2.4	1"	12
FP 14-10/16	200	0.14	837	310	590	135	132	250-1000	pcs.x 2.4	2"	28
FP 20-10/16	200	0.20	1066	310	819	135	132	250-1000	pcs.x 2.4	2"	40
FP 10-10/16	200	0.10	735	310	494	126	131	250-1000	pcs.x 2.9	DN 50	20
FP 16-10/16	200	0.15	940	310	694	126	131	250-1000	pcs.x 2.9	DN 50	30
FP 22-10/16	200	0.22	1135	310	894	126	131	250-1000	pcs.x 2.9	DN 50	45
FP 19-6/10/16/25	500	0.20	1080	440	650	202	200	500-3000	pcs.x 3.1	DN 80	100
FP 205-10/16/25	500	0.21	1160	480	719	225	204	500-2500	pcs.x 3.1	DN 100	105
FP 31-6/10/16/25	500	0.30	1332	480	894	225	204	500-3000	pcs.x 3.1	DN 100	150
FP 40-6/10/16/25	500	0.40	1579	480	1141	225	204	500-3000	pcs.x 3.1	DN 100	200
FP 50-6/10/16/25	500	0.50	1826	480	1388	225	204	500-3000	pcs.x 3.1	DN 100	250
FP 71-6/10/16/25	500	0.71	2320	480	1882	225	204	500-3000	pcs.x 3.1	DN 100	355
FP 41/42-6/10/16/25	700/750	0.40	1470	620	941.4	290	225	500-4000	pcs.x 3.5/3.1	DN 150	280/315
FP 60/62-6/10/16/25	700/750	0.60	1835	620	1306.2	290	225	500-4000	pcs.x 3.5/3.1	DN 150	420/450
FP 80/82-6/10/16/25	700/750	0.80	2200	620	1671	290	225	500-4000	pcs.x 3.5/3.1	DN 150	560/600
FP 112-6/10/16/25	750	1.12	2687	620	2157.4	290	225	500-4000	pcs.x 3.1	DN 150	840
FP 405-6/10/16/25	700	0.41	1380	760	770	395	285	500-4000	pcs.x 3.1	DN 200	300

Figura 50: Catálogo placas

Anexo 2: Aerorefrigerador

Y 330 rpm			
DCV. AXIAL CONDENSER	CAPACITY	SOUND LEVEL	AIRFLOW
CONDENSADOR AXIAL DCV	CAPACIDAD ΔT 15 K	NIVEL SONORO	CAUDAL DE AIRE
	kW	dba	m ³ /h
DCV-0415	100	25	31839
DCV-0416	120	25	30209
DCV-0417	129	25	28099
DCV-0615	150	27	47758
DCV-0616	180	27	45313
DCV-0617	194	27	42148
DCV-0815	200	28	63678
DCV-0816	240	28	60418
DCV-0817	258	28	56198
DCV-1015	250	29	79597
DCV-1016	300	29	75522
DCV-1017	323	29	70247
DCV-1215	300	30	95517
DCV-1216	360	30	90627
DCV-1217	388	30	84297

Figura 51: Modelos Aerorefrigeradores

Anexo 3: Filtro de mangas

A-Factor del Material				
15	12	10	9	6
Mezcla para pastel	Asbesto	Óxido de aspirina	Fertilizante de fosfato de amonio	Carbón activado
Polvo de carton	Polvo para pulido	Carbón negro	Tintas	Carbón negro
Cacao	Material fibroso y celulósico	Cemento	Ceniza flotante	Detergentes
Alimentos	Residuo del agitado en fundiciones	Carbón	Polvo metálico	Humos y otros productos
Harina	Yeso	Caolina	Óxidos metálicos	Leche en polvo
Grano	Cal	Piera caliza	Plásticos	Jabón
Polvo de piel	Perlita	Percloratos	Resinas	
Aserrín	Arena	Sílice	Silicatos	
Tabaco	Sal	Azúcar		
B- Factor de aplicación				
Ventilación de Emisiones Molestas (insidiosas) Alivio de los puntos de transferencia, transportadores, estaciones de embalaje, etc		1.0		
Recolección de Producto Transporte-ventilación del aire, molinos, secadoras relámpago, clasificadores, etc.		0.9		
Filtración del Gas de Proceso Secadoras por aspersion, hornos, reactores, etc		0.8		

Tabla 54: Factores para la velocidad de filtración en sistemas Pulse-Jet

Anexo 4: Precipitador electrostático

<u>Aplicación</u>	<u>w_e (cm/s)</u>
Cenizas volantes de carbón pulverizado	4 - 13,5
Molinos de pulpa y papel	6 - 9,5
Nieblas de ácido sulfúrico	5,5 - 8
Cemento (proceso húmedo)	10 - 11,5
Cemento (proceso seco)	5,5 - 7
Yeso	15,5 - 19,5
Altos hornos	6 - 14
Hornos Siemens-Martin	4,5 - 6
Polvo de catalizador	7 - 8

Figura 52: Velocidad de migración en diferentes industrias

REFERENCIAS

- [1] Consejería de Agricultura y Pesca, “Potencial energético de los subproductos de la industria olivarera en Andalucía”. 2010.
- [2] Ciclo del carbono: <https://www.cointra.es/balance-neutro-carbono/>
- [3] José Pérez, “Entamadora”. <http://www.olivarintegrado.com/index.php/informacion-adicional/173-vocabulario-entamadora>.
- [4] J. B. Franco, “Extracción de aceite de semillas oleaginosas”. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- [5] Pedro Fernández Díez, “XXXII.-Eliminación de partículas”. p.2/23
- [6] Universidad del País Vasco, “Tratamiento de efluentes gaseosos: Eliminación de partículas por métodos mecánicos”
- [7] Yusdel Díaz, José Antonio Echeverría. “Diseño de un filtro de mangas para el sistema de depuración de una acería eléctrica”. January 2016, p. 20-21.
- [8] Luis Cañadas Serrano. Tema 16 “Lavado y filtración de gases”
- [9] Filtros de mangas: <https://siloscordoba.com/es/blog-es/almacenaje-de-grano/que-tipo-de-filtros-se-utilizan-en-las-instalaciones-de-almacenaje-de-grano-y-por-que/>
- [10] Olmer García Bedoya, Germán Benavides, Juan Felipe Rodríguez, Uriel Faruk Alarcón Pinto. “Diseño y prototipo de un precipitador electrostático”. September 2017, p. 4.
- [11] Precipitador electrostático: <http://flex-air.cl/web/product-detail/precipitador-electrostatico-esp/>
- [12] J.D. McKenna, J.C. Mycock, W.O. Lipscomb. “Performance and Cost Comparisons between Fabric Filters and Alternate Participate Control Techniques”. Journal of the Air Pollution Control Association, 15 March 2012
- [13] Josué Ros Gil. “Mejora de la eficiencia energética en instalaciones mediante el empleo de aerorefrigeradores”. Noviembre 2017.
- [14] “Economizadores y calentadores de aire”. Capítulo XIX.
- [15] Calculadora Tablas de Vapor, “Propiedades Generales”. <https://www.steamtablesonline.com>.
- [16] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. “Guía técnica para la medida y determinación del calor útil, de la electricidad y del ahorro de energía primaria de cogeneración de alta eficiencia”, Abril 2008
- [17] Asociación Nacional de Empresas de Aceite de Orujo, “Biomasa”. <https://www.aneorujo.es/productos/biomasa>.
- [18] Pedro Fernández Díez, “Introducción a la combustión”. Termodinámica Técnica. Cap. 16
- [19] Luis Moncada Albitres, “Diseño de Plantas de Procesos Químicos”, Universidad Nacional de Trujillo (Perú).
- [20] John D. McKenna, John C. Mycock A, Arthur B. Nunn, “Controles de Materia Particulada”, Sección 6. Diciembre 1998.
- [21] Carlos Alberto Echeverri Londoño, “Diseño de filtros de talegas”, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Febrero 2008
- [22] Luis Cañadas Serrano. Tema 15 “Electrofiltración”
- [23] Aerorefrigeradores en forma de V: <https://www.lennoxemea.com>

- [24] Mangas filtrantes: <http://www.directindustry.es>
- [25] Oscar Arturo Donoso Baquerizo, "*Pruebas experimentales en un filtro de mangas tipo Pulse Jet del laboratorio de calidad del aire de la FIMCP*", 2010.
- [26] Donald E. Garret "*Chemical Engineering Economics*", pg. 8-21, 1989.
- [27] Richard S.Hall, Jay Matley, Kenneth J.Mc Naughton, "*Cost of Equipment-Data and Estimating Methods*", Enero 1982.
- [28] Esmeralda Portillo Estévez "*Análisis Económicos de Procesos Químicos*", Curso 2017-2018.
- [29] Scott Jenkins "*Chemical Engineering Plant Cost Index: 2018 Annual Value*", Marzo 2019.
- [30] Alfredo Jesús Paredes Guerra "*Diseño mecánico de tolvas industriales*", Abril 2017.
- [31] Válvulas rotativas, Grupo Solids Solutions: <https://www.solids.es>
- [32] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) "*Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias*", Diciembre 2011.