



Universitat Jaume I

**Escola Superior de Tecnologia i Ciències
Experimentals**

Grau en Enginyeria Química

***Sistema de depuración de
contaminantes fluorados
en hornos cerámicos***

Trabajo Fin de Grado

Autor

Alexandru Lucian Rus

Tutor

Eliseo Monfort Gimeno

Castellón, Septiembre 2022

0. RESUMEN

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

La finalidad de este proyecto es la instalación de un filtro depurador de contaminantes, para los hornos utilizados en la producción cerámica de la empresa FABRICACIÓN ESPAÑOLA SANITARIA S.A. (Fabresa) Para así poder cumplir con los Valores Límites de Emisión (VLE) establecidos por los documentos BREF, los cuales se basan las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) para fijar dichos valores.

Tras haber consultado la Autorización Ambiental Integrada (AAI) de la empresa, se detectaron elevados niveles de fluoruro de hidrógeno (HF) provenientes de los dos hornos de cocción del producto sin esmaltar. El HF al ser un contaminante peligroso para las personas y tóxico para plantas y animales, debe ser depurado, lo que condiciona a la empresa a instalar un filtro para depurarlo.

Para la instalación del filtro se han estudiado diferentes alternativas, entre ellas: usar filtros de mangas con adición de reactivo, lechos fijos de adsorción con adición de reactivo o la depuración vía húmeda. Se analizaron las ventajas y desventajas de estos equipos y se seleccionó el más adecuado para tratar este tipo de contaminantes.

Una vez seleccionado el filtro óptimo, se analizaron los diferentes reactivos a utilizar para llevar a cabo la neutralización, bajo la condición de haber elegido un equipo que necesite adición de reactivo. Los parámetros considerados para seleccionar el mejor reactivo fueron: la forma de alimentación, el coste del reactivo y el contaminante a eliminar. Al tratarse de HF, se contemplaron el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y el bicarbonato de sodio (NaHCO_3). Se plantearon los sistemas de reacción y se escogió el más adecuado.

Posteriormente a la selección del filtro óptimo y reactivo a adicionar, se estudió la implementación de un filtro común para las dos chimeneas de los dos hornos o la instalación de un filtro para cada chimenea. Análogamente a los procedimientos anteriores, se estudiaron las dos posibilidades y se eligió la mejor opción.

Finalmente, al haber elegido las mejores alternativas para cada una de las selecciones, se plantearon las ecuaciones correspondientes al funcionamiento del sistema de depuración, los parámetros para su dimensionamiento y un estudio económico en torno a la instalación de este.

1. ÍNDICE GENERAL

0. RESUMEN
1. ÍNDICE GENERAL
2. MEMORIA
3. ANEXOS
4. PLANOS
5. PLIEGO DE CONDCIONES
6. ESTADO DE MEDICIONES
7. PRESUPUESTO

2. MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETO	1
2. ALCANCE	2
3. ANTECEDENTES	6
3.1. NORMATIVA APLICADA	6
3.2. RESULTADOS DE LAS EMISIONES	7
4. NORMAS Y REFERENCIAS	10
4.1. DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS	10
4.2. BIBLIOGRAFÍA	11
5. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	13
5.1. DEFINICIONES	13
5.2. ABREVIATURAS	14
6. REQUISITOS DE DISEÑO	15
6.1. SELECCIÓN DEL FILTRO	15
6.1.1. FILTRO DE MANGAS CON REACTIVO	15
6.1.2. LECHO FIJO DE ADSORCIÓN CON REACTIVO	18
6.1.3. DEPURACIÓN VÍA HÚMEDA	19
6.1.4. COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL FILTRO	21
6.2. SELECCIÓN DEL REACTIVO	23
6.2.1. HIDRÓXIDO DE CALCIO COMO REACTIVO	24
6.2.2. BICARBONATO DE SODIO COMO REACTIVO	25

6.2.3. COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL REACTIVO	25
6.3. SELECCIÓN NÚMERO DE FILTROS	27
6.3.1. UN FILTRO PARA CADA HORNO	28
6.3.2. FILTRO COMÚN PARA LOS DOS HORNOS	29
6.3.3. COMPARATIVA Y SELECCIÓN NÚMERO DE FILTROS	30
6.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN	30
6.4.1. SILO PARA DOSIFICAR EL REACTIVO	30
6.4.2. TRAMO VENTURI	31
6.4.3. VENTILADOR	32
6.5. INTALACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL	32
6.5.1. CONTROLADORES DE TEMPERATURA	33
6.5.2. CONTROLADORES DE PRESIÓN	33
6.5.3. CONTROLADORES DE CAUDAL	34
7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES	35
7.1. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN PLANTEADA	35
7.2. DIÁMETRO DE LAS CONDUCCIONES	37
7.3. LONGITUD DE LAS CONDUCCIONES	38
7.3.1. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 1	38
7.3.2. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 2	39
7.3.3. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 3	40
7.3.4. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 4	41
7.3.5. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 5	42

7.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TEMPERATURAS	43
7.5. PÉRDIDAS DE CARGA	46
7.6. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE DEPURACIÓN	48
7.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS VENTILADORES	49
7.8. CAPACIDAD DEL SILO DE ALMACENAMIENTO	50
8. RESULTADOS FINALES	51
9. PLANIFICACIÓN	52
10. ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS	55
11. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	56
11.1. RESUMEN DEL PRESUPUESTO	56
11.2. PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN	57
11.2.1. GASTOS DIRECTOS	57
11.2.2. GASTOS INDIRECTOS	58
11.2.3. GASTOS TOTALES	59
11.2.4. AMORTIZACIÓN	60
11.2.5. INGRESOS	60
11.3. BENEFICIOS	61
11.3.1. BENEFICIO BRUTO	61
11.3.2. BENEFICIO NETO	61
11.4. FLUJO DE CAJA	63
11.5. VALOR ACTUAL NETO	63
11.6. TASA INTERNA DE RENTABILIDAD	64

11.7. PERIODO DE RETORNO	64
11.8. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA	65

1. OBJETO

El objeto del presente proyecto es buscar una solución a una gran problemática que tienen actualmente las empresas del sector cerámico, la emisión de contaminantes ácidos durante la fabricación de baldosas cerámicas.

Los contaminantes ácidos son generados en aquellas etapas donde tiene lugar un proceso de combustión o en aquellas donde el material procesado llega a alcanzar altas temperaturas. Partiendo de esta información, las etapas capaces de recibir dicha acción son el secado por atomización y el proceso de cocción. Las emisiones de contaminantes ácidos en la etapa de secado por atomización suelen ser bastante bajas y cumplen adecuadamente con los VLE. Por otro lado, los compuestos contaminantes en la etapa de cocción sí son significativos, ya que llegan a superar en varias ocasiones los VLE.

Para lograr unos resultados más cercanos a la realidad, se hizo un estudio de las emisiones de contaminantes de los hornos de la empresa Fabresa, que es una empresa que se dedica a la producción de baldosas cerámicas, teniendo la particularidad de que utiliza arcilla procedente de minas que se molutura por vía seca, en lugar de utilizar arcilla atomizada. Al analizar las corrientes de contaminantes procedentes de los hornos de cocción de la empresa, se encontraron altas cantidades de HF procedentes de los hornos de cocción del producto sin esmaltar (conocido en el argot cerámico como “bizcocho”). De esta forma se vio la necesidad de instalar un sistema de depuración para reducir las emisiones de contaminantes y cumplir con los VLE fijados por la normativa vigente.

Entre las decisiones a tomar para la instalación del sistema de depuración, se ha tenido en cuenta: tipo de filtro a instalar, reactivo y la cantidad de filtros a instalar.

El sistema de depuración en cuestión contará con un filtro de mangas y NaHCO_3 como reactivo, estos fueron seleccionados en base a una comparativa entre varias alternativas y una selección óptima para el caso estudiado.

2. ALCANCE

La emisión de contaminantes durante el proceso de producción de baldosas cerámicas tiene lugar en las etapas en que se trabaja a alta temperatura, principalmente la cocción.

Se define así a la cocción como una operación en donde se somete al material a un ciclo térmico, durante el cual tienen lugar una serie de cambios respecto a su microestructura y se producen determinados cambios en sus propiedades. La cocción es una etapa muy importante, puesto que, de ella dependen la mayoría de las propiedades del producto acabado: resistencia ante agentes químicos, estabilidad dimensional, resistencia mecánica, etc.

Actualmente la operación de cocción de baldosas cerámicas se realiza principalmente en hornos monoestrato de rodillos. Donde el material es desplazado a través del horno por encima de unos rodillos y se aporta calor mediante quemadores de gas natural-aire, los cuales están situados en las paredes del horno. Estos presentan dos focos de emisiones gaseosas, que pueden llegar a ser contaminantes, siendo la chimenea de aspiración de aire de enfriamiento (chimenea de enfriamiento) y la chimenea de aspiración de gases (chimenea de humos).

Por la chimenea de enfriamiento se eliminan aquellos gases calientes empleados en la disminución de la temperatura del material resultante, desde una temperatura máxima que tiene la pieza a la salida del horno (normalmente mayor que la temperatura ambiente). Al no haber descomposición del material durante el enfriamiento y al utilizar aire como agente refrigerante, la corriente de salida de la chimenea es aire caliente. Existe la posibilidad de tener polvo en suspensión dentro de esta corriente, pero al ser una concentración baja, no se precisa de depuración.

Por la chimenea de humos se eliminan los gases provenientes a la operación de calentamiento del material, agrupándose los gases procedentes de la combustión y aquellos procedentes de la descomposición química de la pieza. Desde el punto de vista medioambiental, esta es la chimenea con más interés, puesto que, es la que precisa necesariamente de una depuración.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Para los gases procedentes de la combustión, estos dependen del combustible utilizado para dar lugar a la combustión. El cambio del fueloil o gasoil a gas natural en la industria cerámica ha contribuido a la reducción del problema, minimizando las emisiones de azufre y óxidos de nitrógeno a la atmosfera.

Por otro lado, la descomposición de materia primas supone un problema mayor, puesto que, al introducir en un horno baldosas cerámicas se producen una serie de transformaciones en la microestructura y consecuentemente la liberación de contaminantes ácidos, cuya emisión depende de las materias primas empleadas en la fabricación de estas.

A continuación, se puede observar por medio de la *Tabla M2.1*, las principales transformaciones que se producen normalmente en un ciclo de cocción.

Tabla M2.1 Transformaciones que se producen durante un ciclo de cocción [3]

Temperatura	Transformación
< 150 °C	Eliminación del agua libre
150-250 °C	Eliminación del agua ligada y la descomposición de algunos hidratos de hierro
350-650 °C	Eliminación del agua de constitución
400-600 °C	Combustión de sustancias orgánicas
573 °C	Transformación de cuarzo- α en cuarzo- β
700-800 °C	Inicio de la fusión de los álcalis y óxidos de hierro
800-900 °C	Descomposición de los carbonatos y oxidación del carbón
1000 °C	Inicio de la fusión de pastas de CaO y FeO con formación de silicatos
< 1200 °C	Formación de la fase vítrea con reducción de tamaño y porosidad

Todas aquellas reacciones que se originan durante la etapa de cocción deben tener lugar de forma gradual y controlada, de forma contraria, se pueden llegar a producir defectos irremediables en el producto. Por tanto, el proceso de cocción debe llevarse a cabo en base a un plan previamente establecido que se denomina curva de cocción, dentro de la cual se relaciona la variación de temperatura de dentro del horno con respecto al tiempo. Ver *Figura M2.1* a continuación.

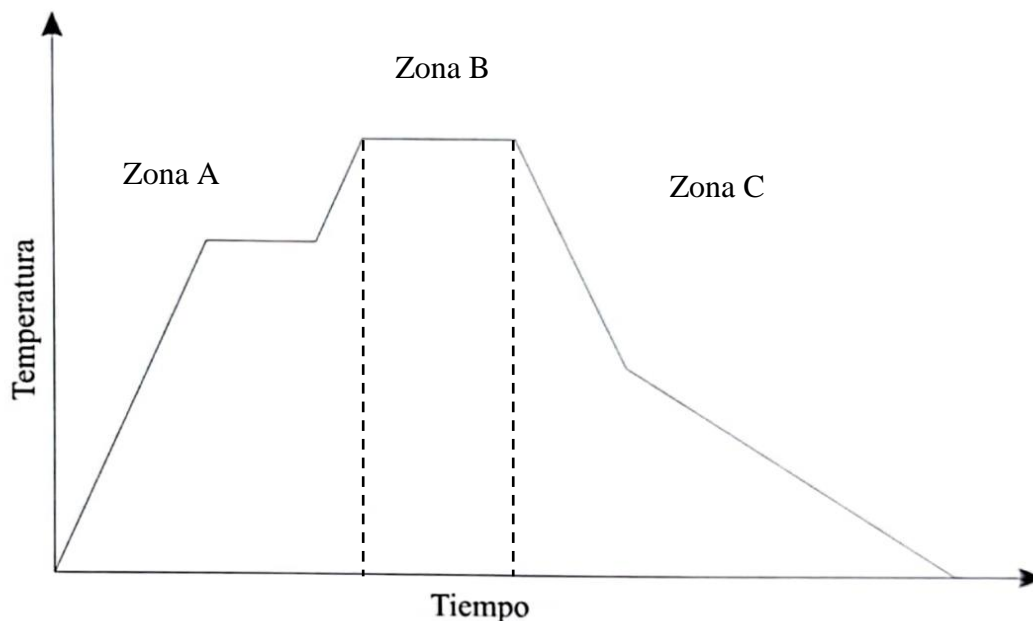


Figura M2.1 Diagrama temperatura-tiempo de un ciclo de cocción [3]

- **Calentamiento (Zona A):** La pieza sufre un calentamiento rápido hasta unos 800 °C, con el fin de eliminar la posible humedad impregnada en la pieza procedente de los procesos anteriores. A su vez se produce la descomposición de los carbonatos y de la materia orgánica presente.
- **Cocción (Zona B):** Se desarrollan las transformaciones físico-químicas más significativas, en un intervalo de 800-900 °C hasta alcanzarse una temperatura máxima de cocción; produciéndose así una reducción de la porosidad.
- **Enfriamiento (Zona C):** Una vez superada la temperatura máxima y dejar de aportar calor se produce un enfriamiento hasta los 573 °C, a partir de donde se produce un enfriamiento más lento para así no originar grietas o deformaciones en la pieza a raíz de la transformación de cuarzo- α en cuarzo- β .

Los gases calientes producidos durante la cocción son liberados a la atmósfera a través de dos focos emisores, la chimenea a la entrada del horno (zona de calentamiento y cocción) y la chimenea a la salida del horno (zona de enfriamiento). Siendo estas mismas las chimeneas de humos y enfriamiento, descritas anteriormente. Generalmente los contaminantes ácidos más presentes suelen ser el HF, HCl, NO_x y SO_x.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Los compuestos de flúor (mayoritariamente HF), se suelen encontrar en forma de compuestos gaseoso a consecuencia de la descomposición de los minerales presentes en las materias primas, como consecuencia de las altas temperaturas, dichos minerales presentan impurezas de flúor en su estructura y pueden llegar a emitirse a partir de temperaturas dentro del intervalo de 400-600 °C. El compuesto originado en mayor medida es el HF, se produce en menor medida el tetrafluoruro de silicio (SiF₄) y fluoruros alcalinos, siendo estos prácticamente despreciables durante la cocción.

Se entienden a los compuestos de cloro (HCl) como las emisiones que se dan generalmente por la presencia del ion cloro dentro del agua empleada como materia prima. La cantidad de cloro puede ser mayor si se utiliza aguas residuales tratadas en el proceso, estas presentan cloro usado para desinfectar, y también se suma el hecho de que las arcillas empleadas contienen bajos niveles de cloro, pero estos pueden ocasionar grandes emisiones si se procesan en grandes cantidades. La mayor parte del cloro se volatiliza durante la etapa de cocción al alcanzarse temperaturas superiores a los 850 °C, ocasionado por la descomposición de las sales minerales del cloro.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son el conjunto de los compuestos de NO y NO₂ presentes en una corriente gaseosa. Suelen proceder de la descomposición de nitratos presentes en las materias primas y la reacción entre el nitrógeno y oxígeno. La mayoría de las emisiones son provenientes de la combustión, en donde los efectos de las altas temperaturas de llama, elevado tiempo de residencia a altas temperaturas y aumento de la presión absoluta; favorecen la formación de estos compuestos.

Los compuestos de azufre (SO_x) son generados principalmente por la oxidación del azufre contenido en los combustibles fósiles que son quemados. Actualmente se busca utilizar gas natural para la combustión al poseer despreciables cantidades de azufre. Pese a esto, en muchas materias primas se les introducen azufre a la composición a través de impurezas, que ocasionan emisiones de compuestos de azufre. Las emisiones ocurren durante la cocción en dos periodos: primera emisión en torno a los 450 °C (oxidación materia prima) y la otra por encima de los 750 °C (descomposición de sulfatos).

3. ANTECEDENTES

3.1. NORMATIVA APLICADA

Actualmente la sensibilidad hacía el medio ambiente está cada vez más presente en la vida de las personas, tanto es así que se ha convertido en un tema muy influyente para la mayoría de las empresas, sobre todo para aquellas que operan dentro del sector cerámico y cuya actividad depende fuertemente de este factor.

En la producción de baldosas cerámicas, los hornos empleados para el proceso de cocción son una fuente emisora de muchos gases contaminantes entre ellos los compuestos fluorados.

El flúor tiene la peculiaridad de ser el elemento más reactivo y electronegativo de la tabla periódica. En base a sus características, este es capaz de reaccionar con los demás elementos (a excepción del neón y helio), debido a esto no se encuentra en estado libre en la naturaleza y es capaz de formar enlaces iónicos y covalentes con el resto de elementos.

Dentro de los compuestos fluorados, el fluoruro de hidrógeno (HF) es el principal compuesto de flúor emitido durante el proceso de cocción para fabricar baldosas cerámicas, estando este presente como gas incoloro o líquido humeante, el cual resulta ser muy irritante y corrosivo. Los humanos son bastante tolerantes al HF gaseoso, aun así, resulta ser uno de los contaminantes más tóxicos y dañinos para las plantas y los animales. [2]

Dentro de la Directiva de Emisiones Industriales (DEI) 2010/75/EU, consta que toda empresa que supere un umbral de producción capacitiva de 75 t/día debe estar en posesión de una Autorización Ambiental Integrada (AAI), donde, deben constar todos los vertidos y/o emisiones que realiza la empresa por medio de su actividad, además de cumplir los valores límite de emisión sujeto a cada uno de los potenciales contaminantes y las condiciones de referencia para cada uno de los parámetros involucrados.

Mediante diferentes muestreos en los cuatro hornos de cocción en intervalos de una hora cada uno para piezas cuadradas de 20x20 cm, se han obtenido los valores recogidos en la *Tabla M3.1.*

3.2. RESULTADOS DE LAS EMISIONES

Tabla M3.1 Datos obtenidos a partir de los muestreos en los hornos de cocción

		Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Media
Horno 1	P (kPa)	94,47	94,44	94,41	94,44
	Q _v (m ³ /h)	5055	5184	5216	5152
	T (°C)	156	163	165	161
	X _{O2} (%)	16,8	16,8	16,7	16,8
	C _{HF} (mg/m ³)	47,0	31,6	36,4	38,3
	C _{HCl} (mg/m ³)	3,3	3,3	3,3	3,3
	C _{NOx} (mg/m ³)	22,1	20,2	25,3	22,5
	C _{SO2} (mg/m ³)	9,5	8,5	9,2	9,1
	C _{PST} (mg/m ³)	1,7	1,6	1,6	1,6
Horno 2	P (kPa)	93,98	94,01	94,04	94,01
	Q _v (m ³ /h)	5255	5285	5361	5300
	T (°C)	159	161	162	161
	X _{O2} (%)	16,2	16,1	16,1	16,1
	C _{HF} (mg/m ³)	12,0	15,5	15,6	14,4
	C _{HCl} (mg/m ³)	3,4	3,6	3,3	3,4
	C _{NOx} (mg/m ³)	18,7	20,8	21,7	20,4
	C _{SO2} (mg/m ³)	9,3	9,4	9,6	9,4
	C _{PST} (mg/m ³)	1,0	0,8	0,8	0,9
Horno 3	P (kPa)	94,84	94,91	94,95	94,90
	Q _v (m ³ /h)	4185	4258	4325	4256
	T (°C)	147	149	151	149
	X _{O2} (%)	17,3	17,2	17,2	17,2
	C _{HF} (mg/m ³)	2,4	2,8	2,4	2,5
	C _{HCl} (mg/m ³)	0,2	0,3	0,2	0,2
	C _{NOx} (mg/m ³)	23,5	22,6	23,2	23,1
	C _{SO2} (mg/m ³)	8,6	8,9	8,3	8,6
	C _{PST} (mg/m ³)	1,5	1,5	1,5	1,5
Horno 4	P (kPa)	94,28	94,31	94,38	94,32
	Q _v (m ³ /h)	10033	10035	10201	10090
	T (°C)	143	145	148	145
	X _{O2} (%)	17,4	17,5	17,5	17,5
	C _{HF} (mg/m ³)	3,1	3,0	3,1	3,0
	C _{HCl} (mg/m ³)	0,2	0,2	0,2	0,2
	C _{NOx} (mg/m ³)	20,9	23,9	21,5	22,1
	C _{SO2} (mg/m ³)	10,4	11,0	11,0	10,8
	C _{PST} (mg/m ³)	1,9	1,6	1,7	1,7

Donde:

$P \equiv$ Presión (kPa)

$Q_v \equiv$ Caudal volumétrico de aire seco (m^3/h)

$T \equiv$ Temperatura ($^{\circ}C$)

$x_{O_2} \equiv$ Contenido en oxígeno (%)

$C_{HF} \equiv$ Concentración de fluoruro de hidrógeno (mg/m^3)

$C_{HCl} \equiv$ Concentración de cloruro de hidrógeno (mg/m^3)

$C_{NO_x} \equiv$ Concentración de óxidos de nitrógeno (mg/m^3)

$C_{SO_x} \equiv$ Concentración de óxidos de azufre (mg/m^3)

$C_{PST} \equiv$ Concentración de partículas totales en suspensión (mg/m^3)

A partir de los resultados obtenidos, se pasaron estos mismos a las condiciones de referencia especificadas en la AAI de la empresa, que son las mismas que se especifican en el documento BREF de la industria cerámica. Estos se indican a continuación:

- Temperatura: 273 K
- Presión: 1 atm
- Gases secos
- Contenido en oxígeno: 18% en volumen

Al tener todos los valores en las correspondientes condiciones de referencia, se pueden consultar los respectivos VLE fijados por la AAI y la documentación vigente del BREF; para ver si dichos valores cumplen con los respectivos valores límite.

Las fórmulas utilizadas para pasar de condiciones normales a condiciones de referencia y los cálculos se detallan en el documento de los *Anexos*.

Esto permite saber cuáles son aquellos valores que precisaran de un tratamiento debido a su problemática de emisión y así poder enfocarse en el diseño de un sistema para reducir las emisiones de dichos valores. En la *Tabla M3.2* se muestran los resultados obtenidos.

Tabla M3.2 Valores de las concentraciones en condiciones de referencia de la AAI

Foco	Contaminante	Muestra (mg/Nm ³)	VLE-AAI (mg/Nm ³)	Cumple SÍ/NO	VLE-BREF (mg/Nm ³)	Cumple SÍ/NO
Horno 1	HF	48,8	10	NO	5	NO
	HCl	4,2	30	SÍ	-	SÍ
	NO _x	28,7	250	SÍ	250	SÍ
	SO _x	11,5	200	SÍ	200	SÍ
	PST	2,1	30	SÍ	30	SÍ
Horno 2	HF	16,0	10	NO	5	NO
	HCl	3,8	30	SÍ	-	SÍ
	NO _x	22,7	250	SÍ	250	SÍ
	SO _x	10,5	200	SÍ	200	SÍ
	PST	1,0	30	SÍ	30	SÍ
Horno 3	HF	3,5	10	SÍ	5	SÍ
	HCl	0,3	30	SÍ	-	SÍ
	NO _x	32,0	250	SÍ	250	SÍ
	SO _x	11,9	200	SÍ	200	SÍ
	PST	2,1	30	SÍ	30	SÍ
Horno 4	HF	4,1	10	SÍ	5	SÍ
	HCl	0,3	30	SÍ	-	SÍ
	NO _x	28,0	250	SÍ	250	SÍ
	SO _x	14,8	200	SÍ	200	SÍ
	PST	2,3	30	SÍ	30	SÍ

Se puede ver de esta forma que las emisiones de HF procedentes de los dos hornos de cocción del producto sin esmaltar no cumplen con la normativa vigente y, por tanto, precisan de un sistema de depuración para reducir dichas emisiones contaminantes.

4. NORMAS Y REFERENCIAS

4.1. DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS

- Directiva 2008/50/CE: relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, donde se definen los límites aceptables (estándares).
- Directiva 2010/75/UE: sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).
- Ley 16/2002, de 1 de Julio: de prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 31/1995, de 8 de Noviembre: De prevención de riesgos laborales
- Ley 34/2007, de 15 de Noviembre: De calidad del aire y protección de la atmosfera.
- Real decreto 100/2011, de 28 de enero: Catálogo de actividades potencialmente contaminantes.
- UNE EN 1911:2011: Emisiones de fuentes estacionarias. Método manual de determinación de HCl.
- UNE-EN 13384-1:2016: Cálculos de chimenea de evaluación de humos.
- UNE EN 14791:2006: Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de óxidos de azufre. Método normalizado de referencia.
- UNE ISO 15713:2007: Emisiones de fuentes estacionarias. Muestreo y determinación del contenido de fluoruros gaseosos.
- UNE 157001-2014: Criterios generales para la elaboración de los documentos que constituyen un proyecto técnico.

4.2. BIGLIOGRAFÍA

- [1] MONFORT, E. (2013). EQ1027 *Tecnología del medio ambiente*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [2] GOMAR, S (2016). *Estudio de la emisión de compuestos de flúor durante la cocción de baldosas cerámicas (Tesis doctoral)*. Escuela superior de tecnología y ciencias experimentales.
- [3] MALLOL, G., MONFORT, E., & BUSANI, G. L. (2001). *Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guías Técnicas de energía y medio ambiente*. Fundación Gas Natural. Instituto de Tecnología Cerámica.
- [4] KIANG, YEN. (1974). *Predicting dewpoints of acid gases*. Chem. Eng. Prog.. 70. https://www.researchgate.net/publication/284829799_Predicting_dewpoints_of_acid_gases
- [5] RODRIGO, M. D. (2003). *Operaciones básicas de flujo de fluidos*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [6] BARBA, A. (2003). *Operaciones básicas de transmisión de calor*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [7] MONFORT, E. (2007). *Seguridad e Higiene en la Industria Química*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [8] MARÍA DEL MAR, C., COLOMER, F. (2019). *Cuaderno de problemas resueltos de Proyectos de Ingeniería*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [9] Empresa Isover. (2022). Internet. <https://www.isover.es/productos/ibr>
- [10] YUNUS C & CIMBALA, J. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. 1ª edición, McGraw-Hill, Tabla A-9.
- [11] Catálogo comercial del Grupo Almesa. (2022). Internet. www.almesa.com

- [12] Distintas conductividades térmicas consultadas. (2022). Internet. <https://tecnol.es/shop/tecnol-basics/es/blog/post/diccionario-sobre-aislamiento-termico.html>
- [13] Standard Practice for Calculating Solar reflectance Sloped Opaque Surfaces. (2019). Internet. <https://www.astm.org/>
- [14] PERRY, R. (1948). *Manual del ingeniero químico*. Mc.Graw-Hill. México
- [15] Catálogo de la empresa SETIMEP. (2022). Internet. <https://manualzz.com/doc/5482432/catalogo-filtro-mangas>
- [16] HOWELL, J. (2002). *Thermal radiation heat transfer*. Castellón, España: Publicaciones de la UJI. Campus del Riu Sec.
- [17] Caracterización de las mangas. (Sin fecha). Internet. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20229/fichero/3.+Anexos+del+Proyecto%252FAnexo8.+Filtro+de+Mangas.pdf>
- [18] Consulta de precios con la empresa Quimialel (2022). Internet. <https://www.quimialmel.com/>
- [19] GALÍNDE, M. (2018). *Cálculo y diseño de filtro de mangas*. Internet. [Calculo y diseño de filtro de mangas tipo Pulse Jet GALINDEZ Pages 1-50 - Flip PDF Download | FlipHTML5](#)
- [20] Consulta de precios de las mangas empresa Filmedia. (2022). Internet. <https://best-filter.com/es/>
- [21] Consulta de valores para la realización de la viabilidad económica. (2022). Internet. <https://datosmacro.expansion.com/tipo-interes>

5. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

5.1. DEFINICIONES

AAI: La Autorización Ambiental Integrada es un documento de carácter público que toda empresa debe poseer para poder llevar a cabo su actividad. En ella se recopilan todos los vertidos y/o emisiones a la atmósfera y mar que una empresa realiza, en base a los valores límites de emisión establecidos a partir de las Mejoras Técnicas Disponibles recogidos en los BREF. Debe ser declarada cada año y necesita de una renovación cada ocho años.

VLE: Los valores Límite de Emisión son los niveles de emisión fijados en función de las Mejores Técnicas Disponibles por la administración competente, los cuales no pueden superados por un foco de emisión determinado.

MTD: Las Mejores Técnicas Disponibles, proveniente de la palabra inglesa BAT (Best Available Technique), son aquellas técnicas más eficaces de cara a la protección medioambiental, siendo todo aquel conjunto de tecnología utilizada para elaborar los Valores Límites de Emisión y así, reducir las emisiones y el impacto que estas pueden tener en el medio ambiente. Todas ellas son recogidas en los BREF.

BREF: Es la connotación de la palabra inglesa BAT Reference Document. Es un documento formulado para ciertas actividades, donde se describen las técnicas implementadas, los niveles de consumo, las emisiones, las consideraciones a tener en cuenta para aplicar las MTD, junto a sus conclusiones sobre estas y las técnicas emergentes.

NEA - MTD: Se conoce como el Nivel de Emisión Asociado a una Mejor Técnica Disponible, siendo este un valor técnico que no es considerado un VLE como tal por la legislación europea. Pese a esto, es un valor utilizado como referencia para establecer VLE prescritos en la legislación, dándose casos en los cuales los valores pueden llegar a coincidir.

Condiciones normales: Son aquellas condiciones específicas de temperatura y presión para expresar el volumen de un gas. Las cuales son 273 Kelvin y 1 atmósfera de presión.

Contaminación atmosférica: Emisiones originadas a partir de la actividad directa o indirecta de los humanos de partículas, vibraciones, calor o ruido a la atmósfera; los cuales tienen efectos adversos para la salud humana, la fauna, la flora y la calidad del medio ambiente en general.

5.2. ABREVIATURAS

NO_x: Término que hace referencia a un grupo de gases los cuales contienen nitrógeno y oxígeno, siendo mayoritariamente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).

SO_x: Denominación que hace referencia a un grupo de gases concretos compuestos por azufre y oxígeno, siendo mayoritariamente trióxido de azufre (SO₃) y dióxido de azufre (SO₂).

PST: Partículas en suspensión totales.

6. REQUISITOS DE DISEÑO

6.1. SELECCIÓN DEL FILTRO

La instalación de un sistema de depuración se debe considerar como última alternativa a la hora de pretender eliminar o reducir el posible impacto ambiental que se pueda llegar a generar a partir de emisiones contaminantes.

Por este motivo, se deben de estudiar todas las posibilidades en relación a las corrientes a tratar y buscar reducir la carga de contaminante que estas conllevan. Entre los principales cambios se destaca realizar modificaciones en el proceso, cambios en los diseños de los equipos, reducciones de los caudales, etc. Si se llega a dar el caso de que las acciones anteriores sean insuficientes para reducir el impacto ambiental ocasionado por las corrientes y cumplir con los límites fijados por los órganos competentes, se deberá realizar un estudio para la instalación de un sistema de depuración de contaminantes.

Dentro de la industria cerámica las emisiones contaminantes suelen estar constituidas por partículas sólidas en suspensión o contaminantes gaseosos, por lo que el sistema de depuración que se pretenda instalar debe ser capaz de separar de la corriente gaseosa ambos tipos mencionados.

A continuación, se van a analizar tres alternativas de sistemas de depuración, viendo cuáles son sus características, las ventajas y desventajas de unos frente a otros y se seleccionará aquella que se adapte mejor a la depuración del HF.

6.1.1. FILTRO DE MANGAS CON REACTIVO

Los sistemas de depuración por medio de filtros de mangas son muy conocidos y empleados al tener un funcionamiento simple y eficiente para la separación de corrientes que poseen contaminantes. La separación se produce por el fenómeno de filtración, que consiste en el paso de las partículas de un fluido a través de un lecho poroso permeable que retiene las partículas sólidas.

Estos ofrecen una gran versatilidad y un elevado rendimiento para la depuración. Por ello, este tipo de filtro es utilizado de forma recurrente en la industria como sistema de depuración.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

En términos generales el método de operación de los filtros de mangas es muy sencillo, estos están formados por una serie de tejidos filtrantes, a los cuales se les denominan mangas, que están situados dentro de una cámara de geometría paralelepípedica o cilíndrica. En la *Figura M6.1* se observa un esquema del funcionamiento de este tipo de equipos.

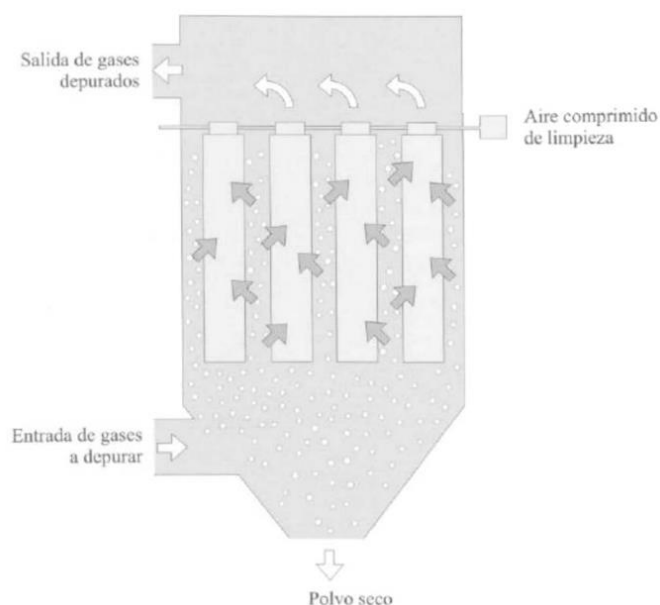


Figura M6.1 Esquema del funcionamiento de un filtro de mangas [3]

El diseño de este sistema posee la ventaja de poder introducir tanto por la parte superior como inferior las corrientes de gases a depurar, puesto que la finalidad es que estas corrientes acaben pasando por el tejido filtrante y así poder retener las partículas contaminantes.

Con el paso del tiempo, el filtro va reteniendo cada vez más partículas y se originan capas de polvo sobre la tela del filtro, esto origina caídas de presión que pueden alterar el correcto funcionamiento del equipo, necesitando entonces de una limpieza.

La limpieza de los filtros se suele realizar principalmente por flexión de las mangas o por chorro de aire. En la *Figura M6.2* se puede ver de forma visual el funcionamiento de estos métodos de limpieza.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Una técnica de flexión es la limpieza sónica, donde por medio de vibraciones se eliminan las capas de polvo de los filtros. Otros métodos de flexión son la limpieza por oscilación y por agitación, en donde se someten los filtros a movimientos oscilatorios y de un lado a otro respectivamente.

Por otro lado, la limpieza por chorro consiste en introducir aire a alta presión dentro de las mangas, para que las partículas se desprendan del filtro por medio de la onda expansiva provocada.

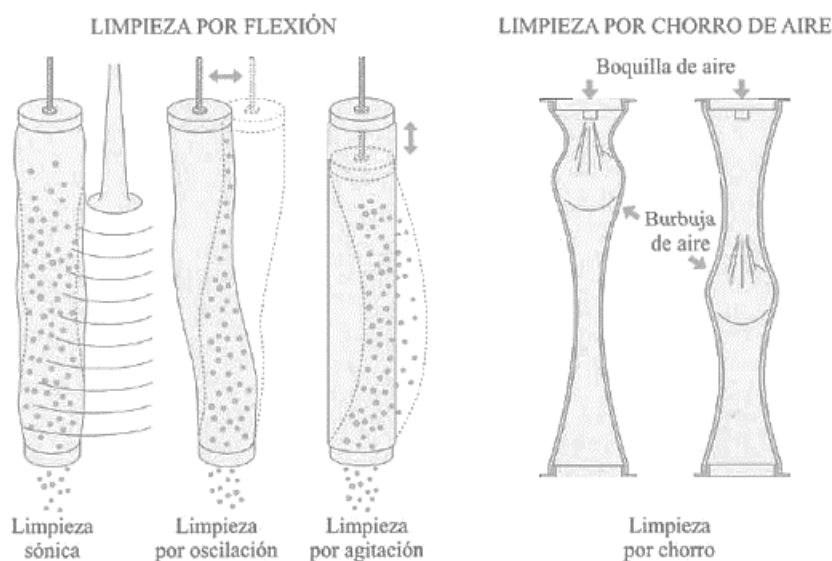


Figura M6.2 Esquema de distintos mecanismos de limpieza de filtros de mangas [1]

La facilidad de limpieza de los filtros de mangas es algo que se tiene muy en consideración a la hora de elegirlos como sistema de depuración.

Este tipo de sistemas se pueden utilizar tanto para concentraciones altas como bajas de partículas. Esto es debido a que el rendimiento de los filtros de mangas no depende de la concentración de partículas a la entrada del sistema. Además, permiten también la separación de partículas de tamaños muy bajos, inferiores al orden de $0,1 \mu\text{m}$.

6.1.2. LECHO FIJO DE ADSORCIÓN CON REACTIVO

La adsorción se define como un fenómeno que consigue la separación de las moléculas no deseadas de una corriente fluida mediante la adherencia de estas moléculas a un sólido.

Los lechos fluidos de adsorción son aquellos donde se hace pasar una fase fluida a través de un lecho fijo adsorbente, el cual ocasiona que las sustancias contaminantes se adhieran a este e impida su paso. Se puede observar el esquema de funcionamiento de este equipo en la *Figura M6.3* vista a continuación.

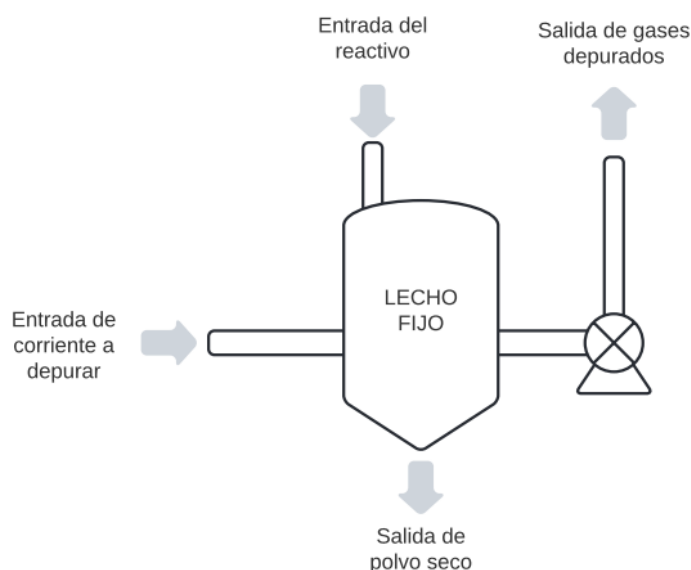


Figura M6.3 Esquema de funcionamiento de un lecho fijo de adsorción

Este tipo de sistemas es una tecnología conocida y empleada en el sector cerámico, pero no tanto como por ejemplo el filtro de mangas, que también tienen además una mayor oferta de proveedores. Por otro lado, la pérdida de carga es menor en estos sistemas comparándolos con los filtros de mangas, ocasionando un menor gasto energético.

A diferencia del filtro de mangas, donde el reactivo utilizado debe estar micronizado para alcanzar un alto rendimiento, el reactivo a alimentar en los sistemas de lechos fijos de adsorción viene granulado, permitiendo que no se ocasionen obstrucciones de carga y descarga en el sistema.

Una gran ventaja de los lechos fijos es su poca necesidad de espacio en comparación con otros sistemas de depuración. Además, el tiempo y coste de instalación también son menores que en otros sistemas.

6.1.3. DEPURACIÓN VÍA HÚMEDA

Para el caso de los sistemas de depuración de vía húmeda, se pone en contacto la corriente gaseosa con una líquida a través de diferentes métodos. Son utilizados tanto para la depuración de sustancias en fase gaseosa como para separar partículas en suspensión.

Normalmente los lavaderos en húmedo constan de dos partes o zonas fundamentales, que puedan encontrarse separadas o unidas.

- Zona de contacto: Como su nombre lo indica, es el lugar donde se produce el contacto entre la fase líquida y gaseosa.
- Zona de separación: Lugar donde se produce la separación entre el gas efluente y el líquido junto a los materiales que este arrastra.

El líquido utilizado para la depuración es recirculado al interior del lavadero tras la decantación de las partículas, dando lugar a un considerable ahorro en el sistema. La temperatura del líquido utilizado debe ser una controlada y para el caso de esta ser una muy elevada (superior a 100 °C), deberá ser reducida por medio de un sistema de refrigeración para así evitar la posible evaporación del líquido.

Entre las distintas ofertas de mercado en torno a estos sistemas existen muchas alternativas de sistemas de depuración vía húmeda, donde las principales diferencias son la manera en la cual la fase líquida se pone en contacto con la fase gaseosa. Se obtienen así muchas variedades de diseño que dependen del rendimiento y el modo de operación de los equipos, siendo los lavaderos de tipo Venturi una de las alternativas más utilizadas.

Para este tipo de sistemas se produce el contacto entre la fase líquida y gaseosa mediante pulverización de la fase líquida sobre la gaseosa, donde la mezcla de las dos fases pasar por un estrechamiento con el fin de aumentar la velocidad de esta y, por tanto, la turbulencia y el contacto entre las fases.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Dentro del sistema se tiene un núcleo formado por un tramo convergente y a continuación un tramo divergente. El agua es pulverizada previamente a llegar al estrechamiento por medio de una bomba o por la pérdida de carga que ocasiona el mismo estrechamiento. En la *Figura M6.4* se aprecia con más detalle el esquema de funcionamiento de este tipo de instalaciones.

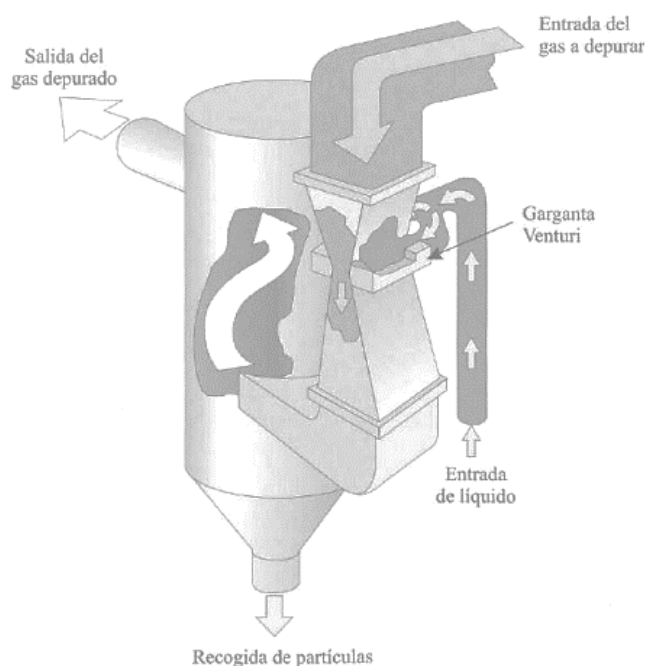


Figura M6.4 Esquema funcionamiento de un lavadero tipo Venturi [3]

En el tramo convergente se alcanza una velocidad elevada de la corriente gaseosa (10-300 m/s), esto provoca que el impacto de las partículas junto a las gotas de agua y su recubrimiento resulten ser mecanismos predominantes para la separación. Si se pretenden depurar partículas más finas también intervendrían mecanismos de difusión.

Después del tramo divergente, la corriente pasa a ser introducida en un separador de gotas, que consisten en una cámara de diámetro superior a la de la conducción por la que circulan los gases y en el interior de la cual la corriente de gas pierde velocidad. Esto permite que las gotas de agua, que recubren las partículas en suspensión, se separen del gas y caigan a la parte inferior donde son recogidas.

La introducción de gargantas de diámetro variable es una mejora importante en el funcionamiento de estos sistemas. Esto ha permitido modificar el área de la sección para la cual la velocidad de los gases es máxima, permitiendo así la variación del rendimiento del sistema en función de la concentración de partículas a la salida de este, reduciendo de forma significativamente los costes de operación al ajustar las pérdidas de carga.

Los rendimientos de estos equipos son muy buenos para el caso de tener que separar partículas sólidas e incluso se podrían utilizar para absorbedores de gases si estos presentan alta solubilidad. Pese a todo esto, requieren altas velocidades (50-100 m/s) para obtener buenos rendimientos de captación de partículas finas (0,2-1 μm), hecho que se traduce en un elevado consumo energético.

Una gran problemática que presenta es el uso de agua durante el procedimiento de depuración al tener que emplear una cantidad considerable de agua para obtener rendimientos elevados. Este inconveniente se suele minimizar con técnicas de recirculación de agua, aun así, los contaminantes al ser transferidos al agua durante el proceso ocasionan que se tenga que realizar un tratamiento posterior, el cual supone a su vez un coste adicional.

6.1.4. COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL FILTRO

Una vez ya se hayan descrito las diferentes alternativas, se han agrupado las principales ventajas y desventajas en forma de *Tabla M6.1*, *Tabla M6.2* y *Tabla M6.3*; donde cada una de ellas presentará los pros y contras en orden a los sistemas descritos en este apartado para así tomar una decisión final.

Tabla M6.1 Principales ventajas y desventajas del filtro de mangas con reactivo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta eficiencia de recopilación de partículas	Requisitos de espacio
Amplia variedad de diseños y formas de limpieza	Posibilidad de que se originen incendios y/o explosiones
Caída de presión y requisitos de potencia razonables	Mantenimiento para purgar las mangas
Recuperación en seco y posibilidad de recirculación de aire	Dificultad para manejar corrientes húmedas

Tabla M6.2 Principales ventajas y desventajas del lecho fijo de adsorción con reactivo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No presenta partes móviles	Tecnología no tan conocida en el sector cerámico
Poca necesidad de espacio para operar	Poca oferta de proveedores
Tiempo y costes de instalación bajos	Problemas con materiales que puedan tender a adherirse a las paredes y se puedan aglomerar

Tabla M6.3 Principales ventajas y desventajas de los lavadores tipo Venturi

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No precisa de mucho espacio	Elevado consumo de agua y de pérdida de carga
Bajo coste de implementación	Generación de aguas residuales y aumento de la humedad de los gases
Permite tratar corrientes de elevada humedad	Posibilidad de legionelosis

Tras agrupar las principales ventajas y desventajas de los diferentes equipos, se debe de tomar la decisión de cuál de ellos es más adecuado para el desarrollo de un sistema de depuración para la reducción de las emisiones de HF provenientes de los hornos de cocción sin esmaltar.

La depuración en vía húmeda es la primera que se tendría que descartar, puesto que para el caso de querer reducir emisiones de HF y al tratarse de un horno, donde la mayoría de las corrientes presentan bajo contenido en humedad, las características de este equipo de depuración no es adecuado para este caso concreto. A su vez, supone un gran aumento de la inversión debido al gasto energético e hídrico.

De esta forma el veredicto radica en elegir entre el filtro de mangas o del lecho fijo de adsorción, ambos necesitando una adición de reactivo. Pese a que la depuración mediante un lecho fijo presenta unas oportunidades muy interesantes desde el punto de vista medioambiental y de operación, **se ha elegido el filtro de mangas** por las facilidades que este proporciona en cuanto a su diseño, la amplia variedad de información y disponibilidad en el mercado, su fácil manejo y porque generalmente es conocido como el método más aceptado para la depuración de HF.

6.2. SELECCIÓN DEL REACTIVO

Al haber elegido el filtro de mangas como el sistema de depuración que se pretende implementar y el haber descrito anteriormente su funcionamiento, se ha de saber que es necesario el adicionar un reactivo, puesto que, el filtro de mangas no depura el HF como tal. Es el reactivo aquello que permite convertir la corriente gaseosa de contaminante a un producto sólido, por medio de la reacción química que se produce, y de esta forma, el filtro de mangas retiene el residuo sólido.

En este caso el contaminante a eliminar sería el HF y se pretende buscar el reactivo óptimo que reaccione con este.

La eficiencia de los diferentes reactivos utilizados para captar el HF presente en la corriente gaseosa depende de una serie de factores:

- Concentración de HF inicial en la corriente
- Tiempo de contacto existente entre los gases y el reactivo
- Temperatura de los gases
- La superficie específica del reactivo
- Turbulencia en la zona de reacción

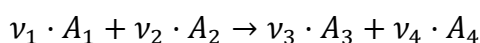
La adecuada selección del reactivo depende de la forma de adición de este, el coste relacionado a su uso y del contaminante que se pretende eliminar. Los reactivos más utilizados para la captación de HF son el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) e hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), donde acaba formándose fluoruros de sodio y calcio respectivamente.

Es muy importante a la hora de caracterizar un reactivo, la cantidad de residuo formado a partir de este. El residuo procedente de estas reacciones es catalogado como tóxico y peligroso, por tanto, en el momento de realizar los tiempos muertos de purga o las paradas para limpiar las mangas, el equipo responsable debe retirar adecuadamente el residuo y almacenarlo para este ser tratado posteriormente de la manera adecuada.

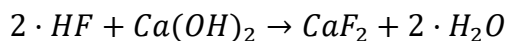
Seguidamente se van a detallar las dos alternativas de reactivos mencionados anteriormente, donde se analizarán las reacciones que se producen para el uso de cada reactivo, los efectos que estos conllevan y una comparativa entre ambos con el fin de seleccionar el óptimo.

6.2.1. HIDRÓXIDO DE CALCIO COMO REACTIVO

En el caso de querer utilizar hidróxido de calcio como reactivo, el sistema de reacción es el siguiente.



De esta forma, se pueden sustituir el HF y el Ca(OH)₂ como reactivos y los productos formados serán fluoruro calcio y agua. Utilizando los adecuados coeficientes estequiométricos para ajustar la reacción en ambos lados, esta quedará tal y como se muestra a continuación.



Para la reacción mostrada, se ha determinado la cantidad de caudal másico puro a reaccionar para tratar un caudal másico supuesto de 1 kg/h de HF. El caudal másico puro y el residuo formado se muestran en la *Tabla M6.4*.

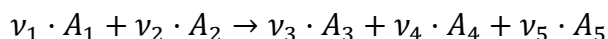
Tabla M6.4 Caudal másico puro y residuo formado para el uso de Ca(OH)₂

Reactivo	Caudal másico puro (kg/h)	Residuo formado (kg/h)
Ca(OH) ₂	8,22	8,13

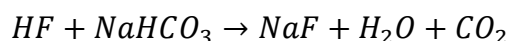
El caudal másico puro mostrado es considerando un ratio estequiométrico de cuatro. Dicha explicación y los presuntos cálculo para los resultados obtenidos se pueden consultar en el documento de *Anexos*.

6.2.2. BICARBONATO DE SODIO COMO REACTIVO

Si se desea emplear bicarbonato sódico como reactivo a adicionar al filtro de mangas, el modelo estequiométrico sería el que se muestra a continuación.



Utilizando NaHCO_3 y HF como reactivo, y fluoruro sódico, agua y dióxido de carbono como productos. Ajustando los coeficientes estequiométricos para ajustar en ambos lados la reacción; se obtiene la siguiente reacción.



De forma análoga al procedimiento anterior, se ha construido la *Tabla M6.5*, para mostrar el caudal másico puro necesario a aportar para que reaccione con un caudal másico de 1 kg/h de HF y el residuo formado a partir de este.

Tabla M6.5 Caudal másico puro y residuo formado para el uso de NaHCO_3

Reactivo	Caudal másico puro (kg/h)	Residuo formado (kg/h)
NaHCO_3	4,20	1,89

A diferencia del hidróxido de calcio, la estequiometría de la reacción o es prácticamente el de la unidad y, por tanto, el ratio estequiométrico utilizado es de uno. Los cálculos se pueden consultar en el documento de los *Anexos*.

6.2.3. COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL REACTIVO

Después de haber detallado las reacciones que tendrían lugar para el uso de cada uno de los reactivos, la cantidad necesaria de estos a aportar para que reaccionen con el HF y la cantidad de residuo formado; se procede a seleccionar el óptimo de los dos.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Desde el punto de vista económico y medioambiental, interesaría tener un proceso de producción dentro del cual se pudiera reutilizar en otras secciones el residuo generado, de no ser esto posible, se precisaría de un tratamiento y vertido del residuo final. Siendo esta la opción más desfavorable.

Ninguno de los residuos da la posibilidad de ser reutilizado, por tanto, es preciso buscar un adecuado tratamiento para cada uno de los residuos.

La elección del reactivo a seleccionar reside en el gasto económico detrás de cada uno de los reactivos. Se debe contemplar el gasto de reacción y el de tratamiento del residuo formado, siendo el coste asociado a cada reactivo la suma de estos.

Se muestra en la *Tabla M6.6* el resumen obtenido para tomar un veredicto en torno al reactivo a seleccionar. Los cálculos realizados para la obtención de los costes se muestran en el documento de *Anexos*.

Tabla M6.6 Resumen de la información recopilada para seleccionar el filtro

	Ca(OH) ₂	NaHCO ₃
Caudal másico puro a aportar (kg/h)	8,22	4,20
Ratio estequiométrico	4	1
Precio del reactivo (€/kg)	0,15	0,50
Coste anual del reactivo (€/año)	9.765,36	16.632,00
Residuo formado (kg/h)	8,13	1,89
Precio tratamiento de residuo (€/kg)	0,18	0,23
Coste anual del tratamiento de residuo (€/año)	11.3442,82	3.442,82
Coste anual de cada reactivo (€/año)	21.355,48	20.074,82

Tras los valores mostrados anteriormente, se puede ver que la cantidad de hidróxido de calcio a adicionar resulta ser el doble que la del bicarbonato de sodio, sin embargo, el precio del hidróxido de sodio resulta más económico.

El residuo formado por el hidróxido de calcio es cuatro veces la cantidad formada de bicarbonato de sodio, siendo esta una de las principales razones por la cual el precio anual del bicarbonato de sodio es ligeramente más económico que el del hidróxido de calcio.

Por esta razón, **se ha seleccionado el bicarbonato de sodio** como reactivo a añadir al filtro de mangas, al ser este un reactivo que no genera tanta cantidad de residuo y pese a ser más caro que el hidróxido, su tratamiento de residuos ocasiona que el coste anual asociado a este reactivo resulte más económico.

Pese a esta decisión, esta decisión no es una irreversible, puesto que, el diseño del silo dosificador de reactivo suele ser uno flexible para poder adaptarse a distintos reactivos y no necesitar que siempre se use el mismo. El bicarbonato de sodio tiene la peculiaridad de tener pocos distribuidores, como por ejemplo la empresa Solvay, ocasionando que no haya más alternativas dentro del mercado. En relación al diseño flexible del silo, se podría llegar a combinar ambos reactivos para ahorrar costes en forma de mezcla.

6.3. SELECCIÓN NÚMERO DE FILTROS

Después de tomar la decisión de utilizar un filtro de mangas con la adición de bicarbonato de sodio como reactivo, queda por ver si es mejor la instalación de un filtro común para las dos salidas de los hornos de cocción o uno a cada una de las salidas.

Para la realización de dicha selección se ha tenido en consideración el tramo de conducciones a instalar, los costes asociados y la caracterización de las corrientes a tratar.

Dentro de las características de las corrientes de salida de los dos hornos de cocción de producto sin esmaltar, los parámetros más significativos a conocer son los del caudal volumétrico (Q_v), la temperatura (T) y la humedad (H). En la *Tabla M6.7* y *Tabla M6.8*, se recopilan los valores obtenidos a partir de tres muestreos, junto a la media de estos, a la salida en cada uno de los hornos.

Tabla M6.7 Valores característicos de las corrientes salientes del primer horno

	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Media
Horno 1	Q_v (Nm^3/h)	3989	4024	4125	4046
	T ($^{\circ}C$)	156	163	165	161
	x_{H_2O} (%)	3,78	3,74	3,68	3,73

Tabla M6.8 Valores característicos de las corrientes salientes del segundo horno

	Parámetro	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Media
Horno 2	Q_v (Nm^3/h)	4682	4786	4845	4771
	T ($^{\circ}C$)	159	161	162	161
	x_{H_2O} (%)	3,46	3,32	3,34	3,37

Para este tipo de equipos, el caudal resulta ser menor comparado con otro tipo de procesos como por ejemplo el secado por atomización. Este depende en gran medida del modo de operación de cada horno.

Los valores de la temperatura dependen del material que se está cocinando dentro del horno y de la curva de cocción empleada.

En cuanto a la humedad, esta depende de la cantidad de agua formada durante la combustión y de aquella que haya sido eliminada de las piezas durante las primeras etapas de cocción.

6.3.1. UN FILTRO PARA CADA HORNO

El emplear un filtro para cada horno, ver *Figura M6.5* para una representación esquemática de dicha situación, es un método de operación cómodo y fácil de utilizar, puesto que, una vez se pusiera en funcionamiento el horno, se activaría el filtro.

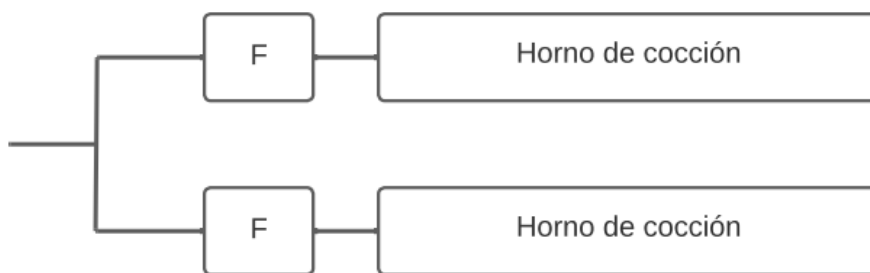


Figura M6.5 Esquema de instalación de un filtro para cada horno

Esta opción supone unos costes más elevados, esto es debido a la necesidad de una mayor superficie para la instalación de los dos filtros, el coste para adquirir los filtros sería el doble que el de uno solo y el coste de limpieza de las mangas (tiempos muertos o de purga) también sería mayor.

Por otro lado, este tipo de alternativa suele ser viable para grandes procesos de fabricación con caudales elevados a la salida de los hornos. Para caudales cercanos a los 20000 Nm³/h, este tipo de sistemas suelen ser más prácticos frente a la instalación de un filtro común.

6.3.2. FILTRO COMÚN PARA LOS DOS HORNOS

Contemplando la alternativa de instalar un filtro común, como se observa en la *Figura M6.6*, para las dos salidas de los hornos de cocción, se han de contemplar las paradas y arrancadas de los hornos y el hecho de que el método de operación resulta ser uno menos sencillo que la instalación de un filtro a cada salida de los hornos.

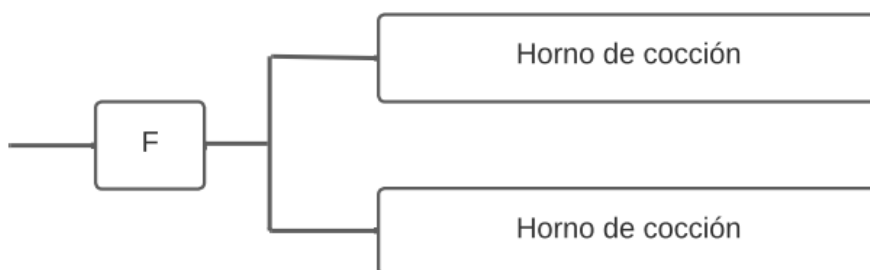


Figura M6.6 Esquema de instalación de un filtro común para los dos hornos

Pese a no resultar ser tan fácil de utilizar, los costes resultan ser significativamente inferiores. El filtro no ocuparía tanta superficie, solo se necesitaría adquirir un filtro y los costes asociados a la limpieza de las mangas serían también inferiores.

Este tipo de opción es un ventajosa para procesos con caudales de producción no tan elevados. Considerando un orden de magnitud de 5000 Nm³/h, la implementación de un filtro común para los hornos es una opción beneficiosa.

6.3.3. COMPARATIVA Y SELECCIÓN NÚMERO DE FILTROS

Una vez conocidas las principales características que supondría el instalar un número determinado de filtros, se ha llegado a la conclusión de que el **utilizar un filtro común para la salida de los dos hornos es la alternativa óptima** al disponer de un bajo orden de magnitud de caudales volumétricos.

Al haber tomado ya la última decisión en torno al sistema de depuración se puede afirmar que el sistema óptimo de depuración para reducir las emisiones de HF a la salida de los hornos de cocción debe contar con un filtro de mangas con la adición de bicarbonato de sodio como reactivo a reaccionar y que para los caudales considerados, es mejor la instalación de un filtro común.

6.4. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN

Para el sistema depurador que se plantea, existen otros elementos aparte del filtro de mangas, puesto que, se debe considerar en todo momento los diferentes tramos de las diferentes conducciones, la forma de dosificar el reactivo, el llevar la corriente al filtro de mangas o la implementación de posibles controladores.

6.4.1. SILO PARA DOSIFICAR EL REACTIVO

Se suelen utilizar los silos en muchos sectores industriales, estos son utilizados para el almacenamiento de sólidos en cantidades variables. El material que los conforma es normalmente acero o concreto armado. La forma de descargarlos es mediante la acción de la gravedad o por procedimientos mecánicos. En la *Figura M6.7* se puede ver una representación esquemática de este tipo de equipo.

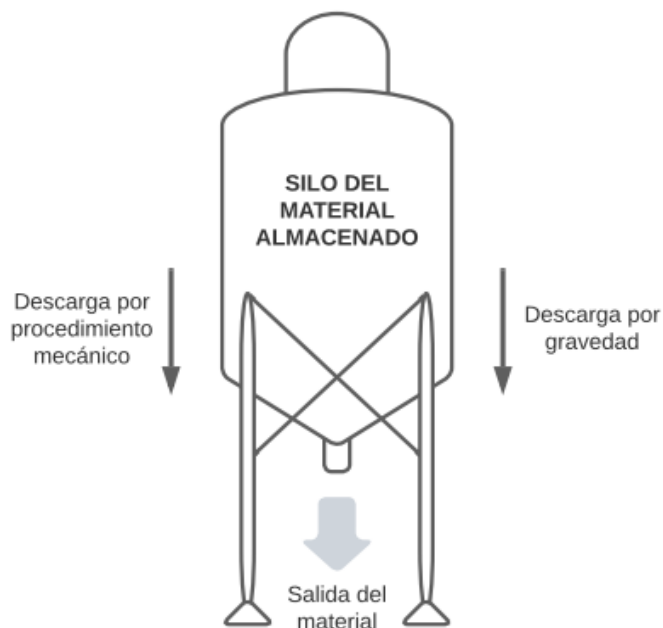


Figura M6.7 Esquema de un silo para el almacenamiento del reactivo

El silo será el lugar de almacenamiento del reactivo, en este caso para el bicarbonato de sodio, para luego ser dosificado al tramo Venturi para se lleve a cabo la reacción explicada anteriormente en el apartado de *Selección del reactivo*.

A su vez, este tendrá un diseño flexible para poderse adaptarse a otro tipo de reactivos y no solo al bicarbonato de sodio. De esta forma, se podría emplear el hidróxido de calcio o una mezcla de ambos, si esto llegase a reducir costes dentro del proceso de depuración.

6.4.2. TRAMO VENTURI

El efecto Venturi es un fenómeno físico empleado para aumentar la velocidad de un fluido por dentro de una conducción, por medio de la reducción de la sección en un punto determinado para así disminuir la presión en ese tramo concreto y aumentar la velocidad.

Dicha bajada de presión y aumento de velocidad en el estrechamiento es muy eficaz para mezclar de forma homogénea la corriente gaseosa y el reactivo empleado para obtener así una corriente en fase sólida permitiendo así la retención de los sólidos por parte de las mangas del equipo de depuración.

Para ello, el reactivo será suministrado desde el silo de reposo al interior del tramo Venturi por medio de un tornillo sin fin, para que así el reactivo sea dosificado de forma continua y en las cantidades necesarias para que se lleve a cabo la reacción deseada. En la *Figura M6.8* es posible apreciar el esquema de este fenómeno físico.

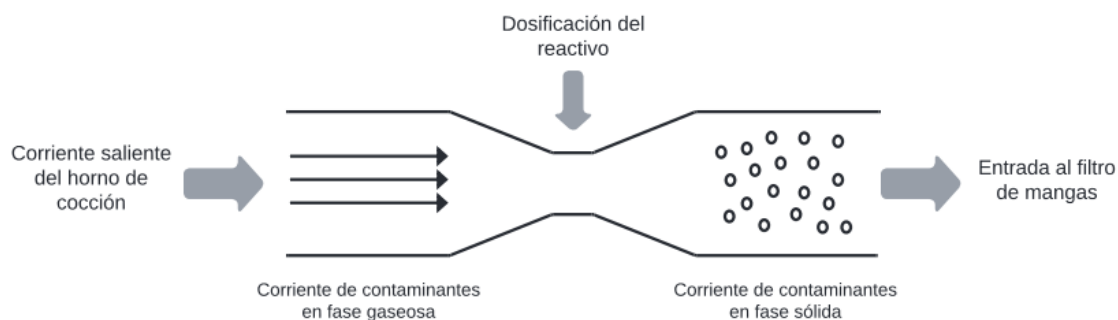


Figura M6.8 Esquema del fenómeno Venturi empleado

6.4.3. VENTILADOR

Mediante la dilución, es posible introducir aire proveniente del exterior junto a los humos de salida, con el fin de reducir la temperatura de la corriente y que esta pueda ser tratada sin el peligro de ocasionar daños en los equipos involucrados. De otra forma, también hace posible el emitir dicha corriente sin ocasionar un cambio brusco en la temperatura ambiente.

Paralelamente, se produce una considerable pérdida de carga mientras que la corriente gaseosa pasa a través de los diferentes equipos de depuración. Se debe buscar una forma para compensar dicha pérdida de carga.

La instalación de un ventilador es una propuesta capaz de solucionar los problemas en torno a los factores mencionados.

6.5. INTALACIÓN DE ELEMENTOS DE CONTROL

Existen ocasiones en las cuales se pueden producir modificaciones no deseadas o perturbaciones en alguna de las variables del sistema. Debido a esto, es muy acertado instalar controladores para poder actuar ante las posibles perturbaciones que pueda sufrir el sistema.

Para el sistema de depuración propuesto, los controladores permiten evitar y corregir posibles perturbaciones en las propiedades de las corrientes a tratar, evitando así el deterioro de los equipos o que estas no se lleguen a depurar correctamente.

6.5.1. CONTROLADORES DE TEMPERATURA

Se ha considerado conveniente el implementar cuatro de controladores de temperatura, bajo el supuesto caso de que la temperatura de las diferentes corrientes llegase a ser superior o inferior a la prevista.

Los primeros controladores de temperatura (CT_1 y CT_2) estarían ubicados a la salida de los hornos de cocción. En caso de detectar temperaturas muy elevadas, mandarían una señal a las corrientes de dilución (D_1 y D_2) para reducir la temperatura y que esta no llegue a dañar a los ventiladores del horno.

El tercer controlador de temperatura (CT_3) se encuentra al inicio del tercer tramo, para accionar una válvula de seguridad (VS_3) en caso de que la temperatura de entrada al filtro fuera superior a $210^{\circ}C$, para que la alta temperatura no ocasione corrosión en las mangas y deteriore así el funcionamiento del equipo.

El cuarto controlador (CT_4) estaría situado a la salida del sistema de depuración, justamente antes de la emisión al exterior, con tal de controlar la temperatura de las emisiones para que así, no se generen emisiones con temperaturas muy distintas a las del medio receptor.

6.5.2. CONTROLADORES DE PRESIÓN

Debido a la gran potencia de los ventiladores considerados, se podría llegar a producir una situación de exceso de absorción de gases y, por tanto, una alteración de la presión del sistema.

Instalando controladores de presión a la salida de los dos hornos y a lo largo del sistema, haría posible que en caso de detectar en esas primeras instancias una caída de presión, se dé una respuesta a los ventiladores, los cuales ya los propios hornos tienen, para corregir y evitar las posibles pérdidas de carga

El ventilador instalado en la parte final del sistema de depuración contaría también con un control de presión, el cual se encargaría de corregir las posibles caídas de presión del sistema. Este necesita complementarse con los ventiladores de los hornos, para que estos corrijan los posibles fallos antes de que avancen demasiado en el sistema y puedan suponer un problema al llegar ya al ventilador instalado.

6.5.3. CONTROLADORES DE CAUDAL

Existe la posibilidad de que los caudales saliente de los hornos sean muy elevados, pudiendo ocasionar fallos en el sistema de depuración. Mediante la instalación de válvulas de control, es posible corregir las diferentes perturbaciones del caudal para que estas no lleguen a suponer un problema de funcionamiento u operación.

Las válvulas de control de caudal (VC_1 y VC_2) se encargan principalmente de regular el caudal de llegada al tramo 3, en caso de que funcione solo uno de los hornos.

7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

7.1. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN PLANTEADA

En base a las suposiciones y los análisis realizado en el apartado anterior, se ha planteado el diseño del sistema de depuración para tratar las corrientes salientes de los dos hornos de cocción.

Para tener una idea representativa del diseño del sistema de depuración, se ha realizado un esquema de este mismo. Ver *Figura M7.1*.

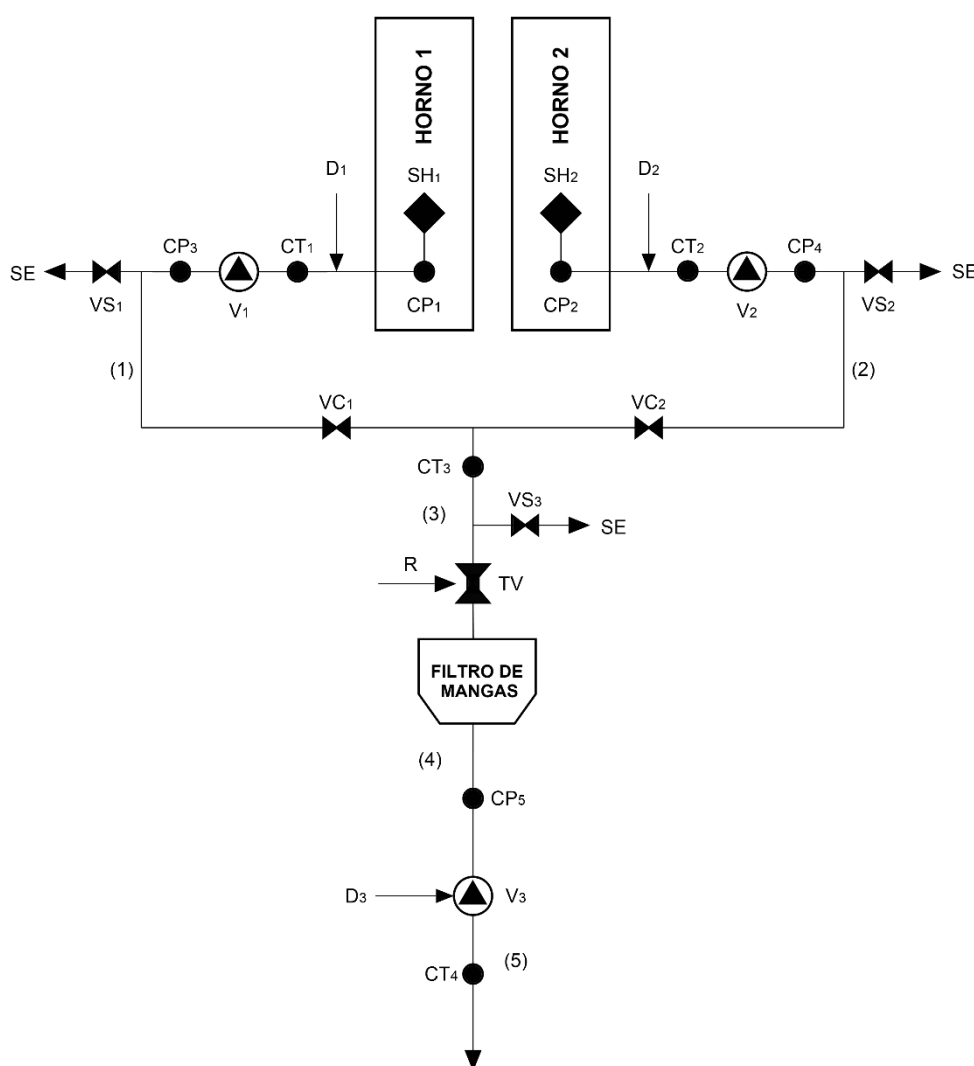


Figura M7.1 Esquema del sistema de depuración

Seguidamente, en la *Tabla M7.1* se detallan el significado de la nomenclatura utilizada en el esquema.

Tabla M7.1 Simbología utilizada en el esquema del sistema de depuración

Símbolo	Descripción
(1)	Tramo de la unión de la corriente de salida del primer horno y la corriente de dilución 1, hasta la unión con el tramo 2
(2)	Tramo de la unión de la corriente de salida del segundo horno y la corriente de dilución 2, hasta la unión con el tramo 1
(3)	Tramo desde la unión de los tramos 1 y 2, hasta la llegada al filtro de mangas
(4)	Tramo que va desde la salida del filtro de mangas al ventilador 3
(5)	Tramo que comprende la unión de la corriente saliente y la corriente de dilución 3, hasta la salida al exterior
SH ₁ , SH ₂	Salidas de los hornos 1 y 2
V ₁ , V ₂ , V ₃	Ventiladores 1,2 y 3
D ₁ , D ₂ , D ₃	Corrientes de aire seco para la dilución
TV	Tramo Venturi en donde se adiciona el reactivo por medio de un tornillo sin fin
R	Reactivo utilizado para convertir el contaminante gaseoso en sólido
SE	Salida de emergencia en caso de que la corriente no cumpla con las especificaciones
CP ₁ , CP ₂ , CP ₃ , CP ₄ , CP ₅	Controladores de presión a lo largo del sistema de depuración
CT ₁ , CT ₂	Controladores de temperatura que accionan las corrientes D ₁ y D ₂
VS ₁ , VS ₂	Válvulas de seguridad que se abren en caso de que la corriente se salga de control
VC ₁ , VC ₂	Válvulas que controlan el caudal en caso del funcionamiento de un solo horno
CT ₃	Control de temperatura que acciona la VS ₃ en caso de no cumplir el rango de temperatura propuesto
VS ₃	Válvula de control que se abre si la temperatura no está en el intervalo propuesto
CT ₄	Controlador de temperatura para accionar D ₃ en caso de que la temperatura de salida prevista al exterior pueda afectar el medio receptor

7.2. DIÁMETRO DE LAS CONDUCCIONES

Las conducciones del sistema de depuración estarán formadas por acero al carbono. Este suele ser un material muy recurrente para este tipo de instalaciones por sus características de muy buena dureza y alta resistencia a las temperaturas con las que se pretende trabajar.

La velocidad de circulación máxima permitida por dentro de las conducciones, fijadas por el BOE-A-1980-23974 es de 30 m/s. Se ha elegido un intervalo entre 18-23 m/s para evitar que las partículas que circulen por dentro no lleguen a sedimentar.

Para los diferentes tramos del sistema, se ha necesitado de la aplicación de un aislante térmico para disminuir las posibles pérdidas de calor (calorifugar), para evitar la instalación de un quemador en caso de que las temperaturas llegasen a bajar drásticamente y no cumplir con la temperatura adecuada a introducir al filtro de mangas, la cual de ser inferior o muy superior podría dañar al equipo y a la instalación. El material seleccionado fue lana de vidrio y se ha supuesto un espesor de 5 cm, donde a su vez se ha recubierto con una capa de aluminio para un buen aislamiento. [5]

En la *Tabla M7.2* se muestran los diferentes diámetros seleccionados para los diferentes tramos del sistema de depuración, junto a las velocidades y los caudales volumétricos que circulan a través de las conducciones. La obtención de dichos valores se encuentra en el documento *Anexos*.

Tabla M7.2 Diámetros seleccionados para los diferentes tramos

Tramo	D_e (m)	D_i (m)	Q_v (m ³ /s)	v (m/s)
1	0,316	0,299	1,5147	21,5146
2	0,316	0,299	1,5582	22,1325
3	0,451	0,428	3,0729	21,3885
4	0,451	0,428	3,0729	21,3885
5	0,502	0,475	3,3117	18,3119

7.3. LONGITUD DE LAS CONDUCCIONES

Para la obtención de las longitudes de las conducciones se ha estimado la cantidad de metros necesarios para los tramos rectos y los accidentes necesarios.

Dentro de las estimaciones no se han considerado las longitudes de los tramos de dilución, pero sí han sido considerados para los estudios de *Viabilidad económica*. A su vez, no se han contemplado las válvulas de seguridad y las longitudes de los tramos de las salidas de emergencia, al estar cerradas durante el funcionamiento normal. Sí se tomaron en consideración para el apartado de *Viabilidad económica*.

7.3.1. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 1

Para el primer tramo del sistema, se ha elaborado una vista más en detalle de este tramo por medio de la *Figura M7.2*.

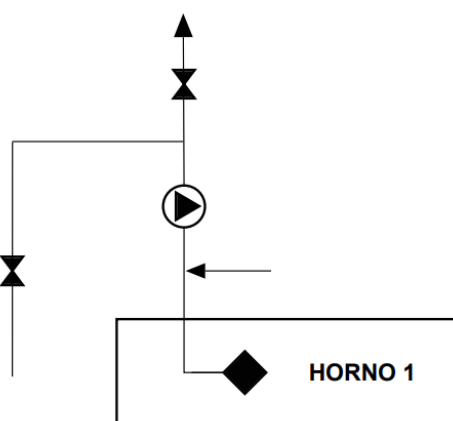


Figura M7.2 Esquema del tramo 1

Para este primer tramo la corriente de contaminantes a la salida del primer horno de cocción es mezclada con una corriente de aire seco proveniente de un ventilador, con el objetivo de diluir dicha corriente de contaminantes y posteriormente mezclarse con la corriente del tramo 2.

El tramo cuenta con una válvula de seguridad para abrir una salida de emergencia en caso de que los diferentes controladores indiquen que la corriente opera fuera de intervalos de trabajo sugeridos. A su vez, cuenta con una válvula para controlar el caudal previamente a la unión con el tramo 2.

Para la conducción del aire seco utilizado para diluir y el tramo de seguridad, tienen el mismo diámetro de conducción que el del tramo 1. Esto está aplicado también al tramo 2, el cual se detalla más adelante.

En la *Tabla M7.3* se recopilan las estimaciones de los tramos rectos y los accidentes a considerar para este primer tramo.

Tabla M7.3 Longitud y accidentes del tramo 1

Elemento	Cantidad
Tramos rectos (m)	12
Codo de 90° standard (unidades)	2
Entrada ligeramente redondeada (unidades)	2
T standard (unidades)	1
Válvula de diafragma (unidades)	1

7.3.2. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 2

Se puede observar por medio de la *Figura M7.3*, una esquematización del segundo tramo del sistema.

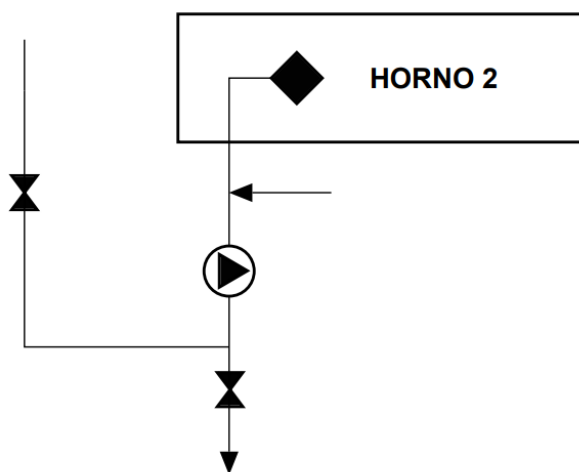


Figura M7.3 Esquema del tramo 2

El funcionamiento de este segundo tramo análogo al descrito en el primer tramo.

Se recopila en la *Tabla M7.4* los diferentes accidentes y la longitud de los tramos rectos para este segundo tramo.

Tabla M7.4 Longitud y accidentes del tramo 2

Elemento	Cantidad
Tramos rectos (m)	12
Codo de 90° standard (unidades)	2
Entrada ligeramente redondeada (unidades)	2
T standard (unidades)	1
Válvula de diafragma (unidades)	1

7.3.3. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 3

Para una explicación en mayor profundidad de este tercer tramo del sistema, se puede ver un esquema de este mediante la *Figura M7.4*.

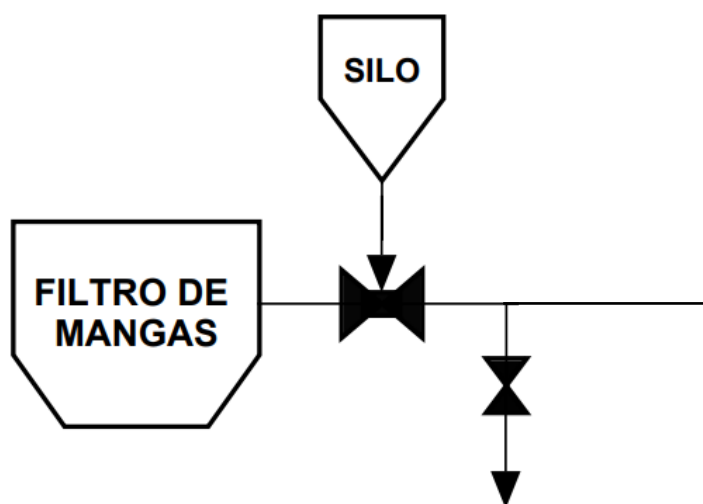


Figura M7.4 Esquema del tramo 3

Para este tercer tramo, las corrientes procedentes de los anteriores tramos se juntan para pasar por el tramo Venturi donde se produce la adición del reactivo proveniente del silo, mediante un tornillo sin fin, a la corriente.

Posteriormente, la corriente a la salida del tramo Venturi, la cual por medio de la reacción con el reactivo pasará a formar sólidos, se introduce en el filtro de mangas.

Este tramo cuenta con una salida de emergencia, controlada por una válvula de seguridad, en caso de que la temperatura de la corriente no esté entre el intervalo permisible.

La longitud de este tramo es más corta que sus predecesores, en la *Tabla M7.5* se recopilan los distintos accidentes y la longitud de los tramos rectos.

Tabla M7.5 Longitud y accidentes del tramo 3

Elemento	Cantidad
Tramos rectos (m)	3,5
T standard (unidades)	1
Salida redondeada (unidades)	1
Venturi	1

7.3.4. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 4

El siguiente tramo viene representado en la *Figura M7.5*.

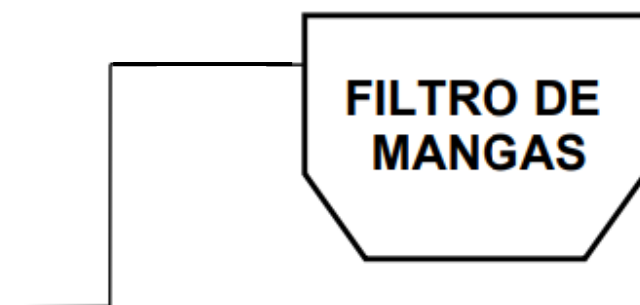


Figura M7.5 Esquema del tramo 4

El cuarto tramo del sistema inicia con la salida de la corriente depurada del filtro de mangas, la cual es llevada hasta el ventilador 3 para la dilución final. Se pueden observar los distintos accidentes y la longitud de los tramos rectos en la *Tabla M7.6*.

Tabla M7.6 Longitud y accidentes del tramo 4

Elemento	Cantidad
Tramos rectos (m)	6
Codo de 90° standard (unidades)	2
Entrada ligeramente redondeada (unidades)	1

7.3.5. LONGITUD Y ACCIDENTES DEL TRAMO 5

El quinto y último tramo del sistema de depuración propuesto, se muestra en la *Figura M7.6*.

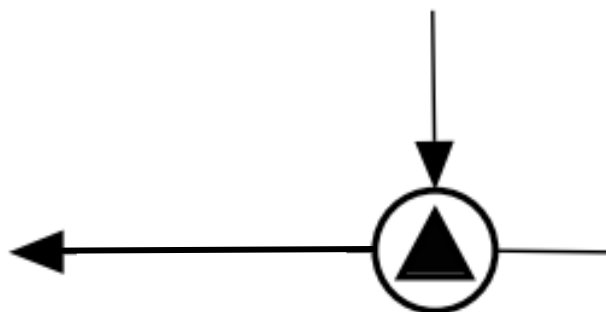


Figura M7.6 Esquema del tramo 5

En este tramo final, se produce la dilución de la corriente mediante la inserción de aire seco exterior, con el fin de reducir la temperatura de la corriente ya depurada y que esta no altere la temperatura del medio receptor. En la *Tabla M7.7* se recopilan los diferentes accidentes y la longitud de los tramos rectos.

Tabla M7.7 Longitud y accidentes del tramo 5

Elemento	Cantidad
Tramos rectos (m)	6
Entrada ligeramente redondeada (unidades)	1
Salida redondeada (unidades)	1

7.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TEMPERATURAS

Las temperaturas medidas a la salida de los hornos de cocción no tenían una magnitud tan elevada, esto debido principalmente a que el orden de magnitud de los caudales de producción de la empresa no era muy elevado.

Para la realización de los cálculos se ha fijado que los gases provenientes de los hornos abandonaban estos a una temperatura de 170 °C.

Por otro lado, la temperatura de entrada al filtro se ha fijado en ser aproximadamente de 160 °C mediante la introducción de aire seco.

A su vez, se precisa de la instalación de un tercer ventilador en el último tramo de la conducción para reducir la temperatura de salida a 145 °C, con tal de no afectar al medio receptor.

Para los ventiladores 1 y 2, los cuales están situados en los tramos 1 y 2 del sistema, el aire introducido para reducir la temperatura proviene del interior de la misma planta. Se ha tomado así un valor de 30 °C al contemplar que la temperatura ambiente sería una superior a la normal debido al calor desprendido por los hornos.

Respecto al tercer ventilador, el quinto tramo al estar ubicado en el exterior de la planta se utilizaría aire a temperatura ambiente. Se ha fijado una temperatura media de 15 °C debido a la localización geográfica de la empresa, siendo esta la temperatura media exterior a lo largo del año.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

En la *Tabla M7.8* se recogen los diferentes caudales de dilución necesarios en los distintos ventiladores, para alcanzar la temperatura establecida en cada punto. Los cálculos se pueden consultar en los *Anexos*.

Tabla M7.8 Temperaturas y caudales de dilución necesarios 5

Corriente de dilución	T_h (°C)	T_d (°C)	T_f (°C)	Q_d (m ³ /s)
D1	170,0	30	160	0,0836
D2	170,0	30	160	0,0860
D3	154,9	15	145	0,1748

Para la realización de los distintos cálculos a lo largo de los diferentes tramos del sistema de depuración, es necesario conocer los parámetros que caracterizan a las corrientes con las que se está trabajando. Teniendo principalmente los caudales volumétricos y las densidades, estando estos en condiciones reales o normales según el requerimiento de los cálculos, el calor específico de las corrientes y las temperaturas de entrada y salida de cada tramo. Los datos son recopilados en la *Tabla M7.9*.

Tabla M7.9 Parámetros que caracterizan las corrientes del sistema

Tramo	Q_{vR} (m ³ /s)	Q_{vN} (Nm ³ /s)	ρ_R (kg/m ³)	ρ_N (kg/Nm ³)	C_p (J/(kg·K))	T_0 (°C)	T_s (°C)
1	1,5147	0,9550	0,817	1,296	1116,85	160,0	158,5
2	1,5582	0,9824	0,817	1,296	1116,85	160,0	158,5
3	3,0729	1,9442	0,817	1,291	1116,80	158,5	158,2
Filtro	3,0729	1,9455	0,817	1,290	1116,79	158,2	155,5
4	3,0729	1,9578	0,817	1,281	1116,71	155,5	154,9
5	3,2477	2,1211	0,847	1,297	1116,34	145,0	144,5

Los cálculos se encuentran en el documento de los *Anexos* y el resumen de las temperaturas obtenidas se muestra en grados centígrados (°C), pero los cálculos se realizaron en Kelvin (K).

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Se muestra en la *Figura M7.7* una esquematización de las diferentes temperaturas a lo largo del sistema de depuración.

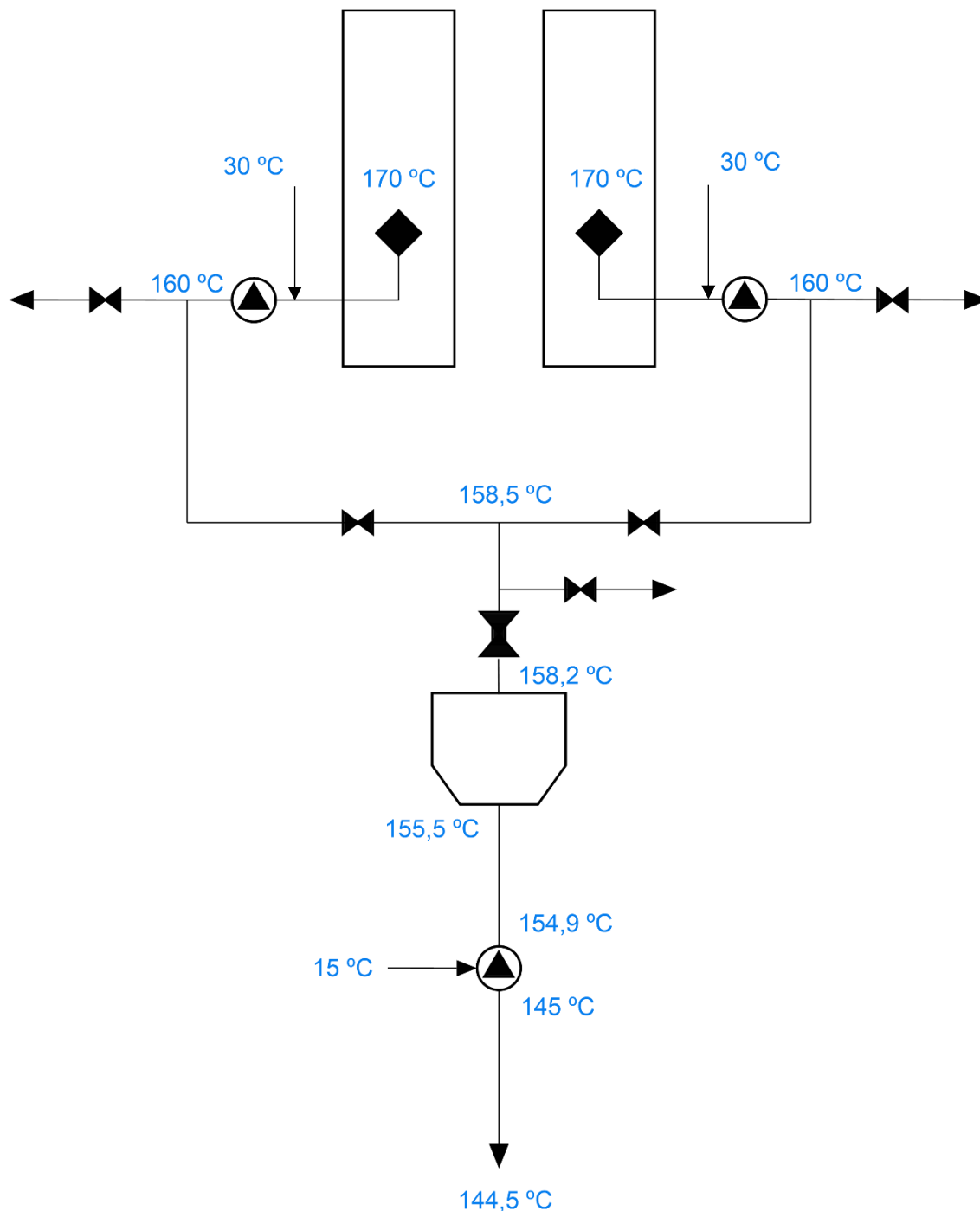


Figura M7.7 Esquema de las diferentes temperaturas a lo largo del sistema de depuración

7.5. PÉRDIDAS DE CARGA

Los ventiladores utilizados en el sistema de depuración al ser de ámbito comercial suelen compensar pérdidas de carga del orden de 5000 Pa.

Paralelamente, para el dimensionamiento del ventilador 3, siendo este aquel que se pretende instalar, se necesita conocer la suma de las pérdidas de carga de los tramos anteriores y las ocasionadas por el filtro de mangas.

Se ha elaborado la *Tabla M7.10*, donde se recogen las pérdidas de carga de los diferentes tramos del sistema de depuración y las correspondientes al filtro de mangas.

Tabla M7.10 Resumen de las pérdidas de carga obtenidas

Tramo	- ΔP (Pa)
1	1137,26
2	1203,52
3	402,61
Filtro de mangas	714,40
4	368,35
5	205,52

Se obtiene en total unas pérdidas de carga en todo el sistema de 4031,66 Pa, donde 3826,14 Pa son las pérdidas consideradas para el diseño del ventilador 3, el cual las ha de subsanar. Los valores y los cálculos se detallan en el documento de *Anexos*.

Las pérdidas de carga son las que afectan la potencia a instalar en los ventiladores, sobre todo en el tercer ventilador el cual ha de subsanar dichas pérdidas. Esto es explicado en mayor detalle en los apartados posteriores.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Se muestra a continuación un esquema de las distintas pérdidas de carga obtenidas a lo largo del sistema de depuración, hasta la llegada al ventilador 3 para la compensación de estas mismas. Ver *Figura M7.8*.

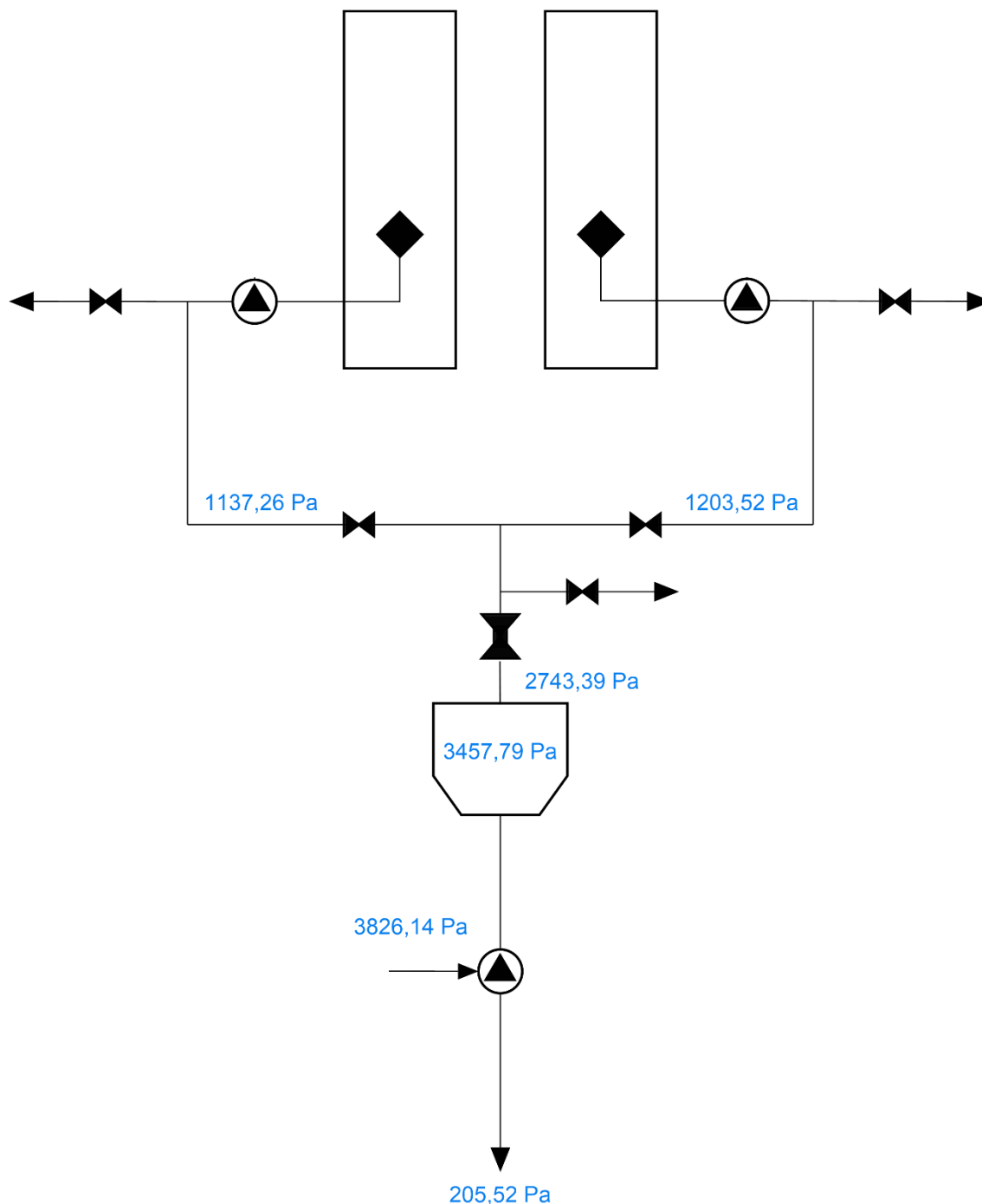


Figura M7.8 Esquema de las pérdidas de carga del sistema de depuración

7.6. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE DEPURACIÓN

Respecto al material a utilizar, se realizó una comparativa entre las mejores alternativas considerando aspectos clave el intervalo de temperatura de operación, la resistencia química al tratamiento de ácidos, al ser estos el principal compuesto a eliminar, y el coste asociado al material.

Después de realizar comparaciones entre las opciones que mejor se ajustaban al sistema propuesto, se seleccionó el Nomex Teflonado como el material que conformaría a las mangas del interior del filtro.

Por otro lado, el número de mangas a instalar se ha estimado como 85 mangas, cada una de estas con un área de $1,62 \text{ m}^2$. En la *Figura M7.9* se puede observar el esquema del dimensionamiento del filtro de mangas y las mangas de su interior.

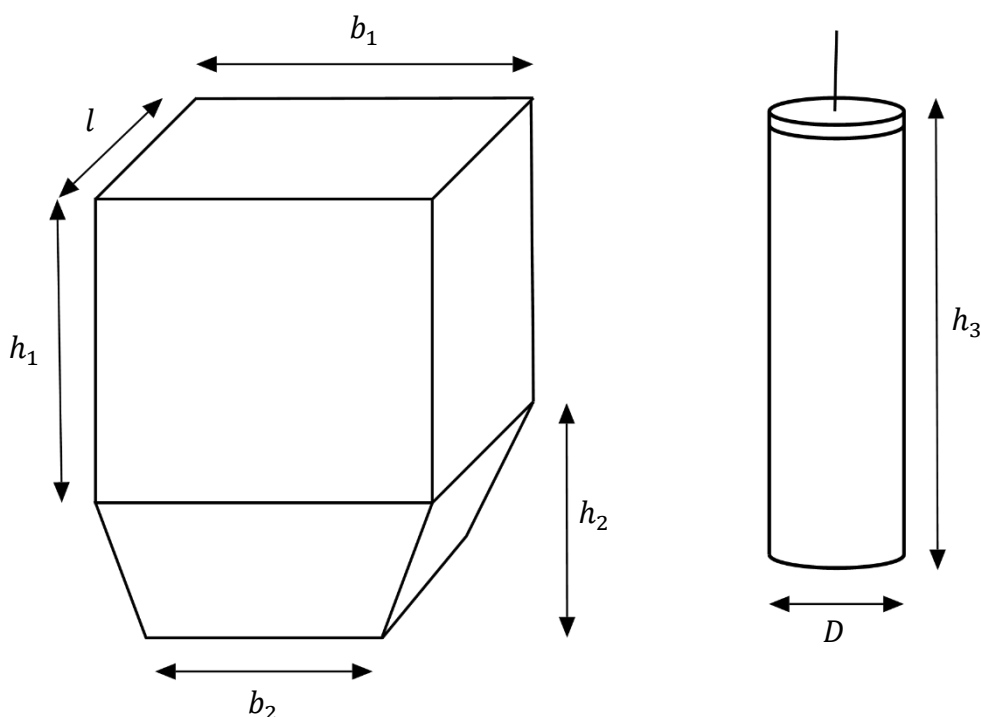


Figura M7.9 Esquema de las dimensiones del filtro de mangas y las mangas internas

Los valores cálculos y los resultados obtenidos se pueden consultar en los *Anexos*.

Los valores de las diferentes longitudes se pueden consultar en la *Tabla M7.11* vista a continuación, en donde se adjuntan también el valor de las áreas de cada elemento.

Tabla M7.11 Dimensiones del filtro y las mangas de su interior

Filtro de mangas					
h_1 (m)	h_2 (m)	l (m)	b_1 (m)	b_2 (m)	A (m ²)
4	2	3	3	0,5	15,50
Mangas en el interior del filtro					
Material	h_3 (m)	D (m)	Número de mangas	A (m ²)	
Nomex Teflonado	2	0,25	85	1,62	

En cuanto a los tiempos de purga o limpieza de las mangas, se utiliza la limpieza por chorro de aire a presión en intervalos de 15 minutos. Este método de limpieza permite que el residuo formado se desprenda de las mangas a causa del efecto expansivo y caiga por la parte inferior del filtro de mangas.

7.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS VENTILADORES

Los distintos ventiladores utilizados en el sistema de depuración deben funcionar con una potencia determinada y se debe tener clara la ubicación de estos.

En cuanto a las diversas ubicaciones, los dos primeros ventiladores son una adición a sus respectivos hornos de cocción ubicados a cierto nivel del suelo de la planta y contando estos con una plataforma para su acceso. Por otro lado, el tercer ventilador se ubica a la misma altura del suelo.

Los primeros dos ventiladores, situados en el tramos 1 y 2, no necesitan una alta potencia al ser estos utilizados para controlar los gases saliente del horno y no compensar las pérdidas de carga. Se tomó la decisión de instalar una potencia del torno al 10% respecto a la empleada por el ventilador 3.

El tercer ventilador, ubicado en el último tramo del sistema, tiene la función de regular el conjunto de gases de todo el sistema de depuración y también, vencer las pérdidas de carga acumuladas hasta ese punto.

En la *Tabla M7.12* se recogen las potencias necesarias de cada ventilador y las que se ha considerado a instalar finalmente. Los cálculos se detallan en los *Anexos*.

Tabla M7.12 Dimensiones del filtro y las mangas de su interior

Ventilador	Potencia requerida (kW)	Potencia instalada (kW)
1	-	2,5
2	-	2,5
3	18,71	25,0

7.8. CAPACIDAD DEL SILO DE ALMACENAMIENTO

El dimensionamiento del silo para la dosificación debe ser acorde a la cantidad necesaria del mismo. El respectivo cálculo ha sido sobredimensionando con el fin de evitar la necesidad de recargarlo cada día, pero, considerando que el reactivo no debería permanecer mucho tiempo en el interior de este para evitar problemas de hidratación. Se optó así por una capacidad de 7 días.

Al plantear un diseño flexible de este, en caso de tomarse la decisión de cambiar el reactivo empleado en un futuro, se realizaron los cálculos considerando los dos tipos de reactivo ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaHCO_3) para ver las capacidades que se necesitarían para ambos casos. A su vez, se ha supuesto una capacidad intermedia en caso de utilizarse una mezcla de ambos reactivos. Los datos obtenidos se pueden ver en la *Tabla M7.13* y el cálculo es mostrado en el documento de los *Anexos*.

Tabla M7.13 Capacidades del silo de almacenamiento según el reactivo empleado

Reactivo	m_R (kg/día)	V_S (m ³)
CaOH_2	197,28	0,325
NaHCO_3	100,80	0,625
Mezcla	-	0,5

8. RESULTADOS FINALES

Para poder concluir con el estudio, se ha elaborado la *Tabla M8.1* en donde se pueden ver las concentración de HF, siendo esta la suma de las concentraciones de HF salientes de los dos hornos de primera cocción, junto a la reducción estimada que se debería de producir para poder respetar los diferentes valores límites de emisión fijados por la AAI y el BREF. Los cálculos se pueden consultar en su debido apartado dentro del documento de los *Anexos*.

Tabla M8.1 Resultados finales

	c_{HF} (mg/Nm ³)	VLE-AAI (mg/Nm ³)	VLE-BREF (mg/Nm ³)	Reducción estimada (%)
Resultado	64,8	10	5	92,3

Se puede observar de esta forma, que para el estudio y el diseño realizado la concentración de HF se reduciría a más de un 90 % para poder respetar los distintos valores de emisión establecidos.

En la totalidad del proyecto se ha centrado principalmente en el tratamiento del HF, al ser este el contaminante más presente y de mayor magnitud. Pese a esto, los demás contaminantes no fueron considerados en la mayoría de los cálculos al respetar considerablemente bien los Valores Límites de Emisión (VLE) establecidos. Estos sí fueron considerados para determinar la temperatura de entrada al filtro de mangas, puesto que, la presencia de estos por pequeña que sea puede llegar a ocasionar grandes deterioros en los equipos de depuración, como por ejemplo los contaminantes derivados del azufre.

9. PLANIFICACIÓN

La planificación es importante, puesto que permite tener una estimación del tiempo necesario para llevar a cabo cierta actividad y la cantidad de recursos necesarios. Es por ello que se debe de tomar en consideración las tareas a realizar, el tiempo invertido en cada una de estas y las interrelaciones o dependencias entre unas y otras. [8]

Para el presente proyecto, se ha realizado la planificación en relación a la instalación del sistema de depuración dentro de la planta ya existente. Las tareas y el tiempo asociado a estas se muestran en la *Tabla M9.1*.

Tabla M9.1 Tareas y tiempo asociado para la instalación del sistema de depuración

Tarea	Descripción	Precedencia	Duración (días laborables)
A	Diseño conceptual	-	30
B	Documentación	A	14
C	Solicitud y envío de los equipos	B	21
D	Preparación de las instalaciones existentes	B	14
E	Instalación de las conducciones	D	27
F	Instalación de los equipos	C, E	18
G	Realizar conexiones entre equipos	F	12
H	Instalación eléctrica	D	7
I	Automatización	G, H	12
J	Puesta en marcha y pruebas	I	10

Al tener ya descritas las diferentes actividades, su precedencia y duración, se ha de resaltar el hecho de que todo lo mencionado anteriormente es una aproximación la cual podría sufrir retrasos inesperados. Los posibles imprevistos son citados en el *Pliego de Condiciones* de este documento.

Para la realización de las distintas tareas se ha asumido un horario de trabajo de 8h diarias de lunes a viernes, siendo este un caso más común al ser una jornada completa de 40h semanales. Las fechas de la planificación se detallan en la *Tabla M9.2*.

Tabla M9.2 Planificación detallada de las diferentes actividades

Actividad	Duración (días)	Inicio	Fin
Diseño conceptual	30	mar 19/10/21	lun 29/11/21
Documentación	14	mar 30/11/21	vie 17/12/21
Solicitud y envío de los equipos	21	lun 20/12/21	lun 17/01/22
Preparación de las instalaciones existentes	14	lun 20/12/21	jue 06/01/22
Instalación de las conducciones	27	vie 07/01/22	lun 14/02/22
Instalación de los equipos	18	mar 15/02/22	jue 10/03/22
Realizar conexiones entre equipos	12	vie 11/03/22	lun 28/03/22
Instalación eléctrica	7	vie 07/01/22	lun 17/01/22
Automatización	12	mar 29/03/22	mié 13/04/22
Puesta en marcha y pruebas	10	jue 14/04/22	mié 27/04/22

Se puede ver de esta forma que, bajo la suposición de no ocurrir ningún retraso o imprevisto, el proyecto iniciaría el 19/10/21 y terminaría el 27/04/22. Teniendo así, una duración total de 190 días totales, de los cuales 165 días serían laborables.

A partir de los datos de esta última tabla, es posible elaborar el diagrama de Gantt, el cual es la representación de la duración de un proyecto a partir de la duración de las actividades que lo conforman. Ver *Figura M9.1*.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

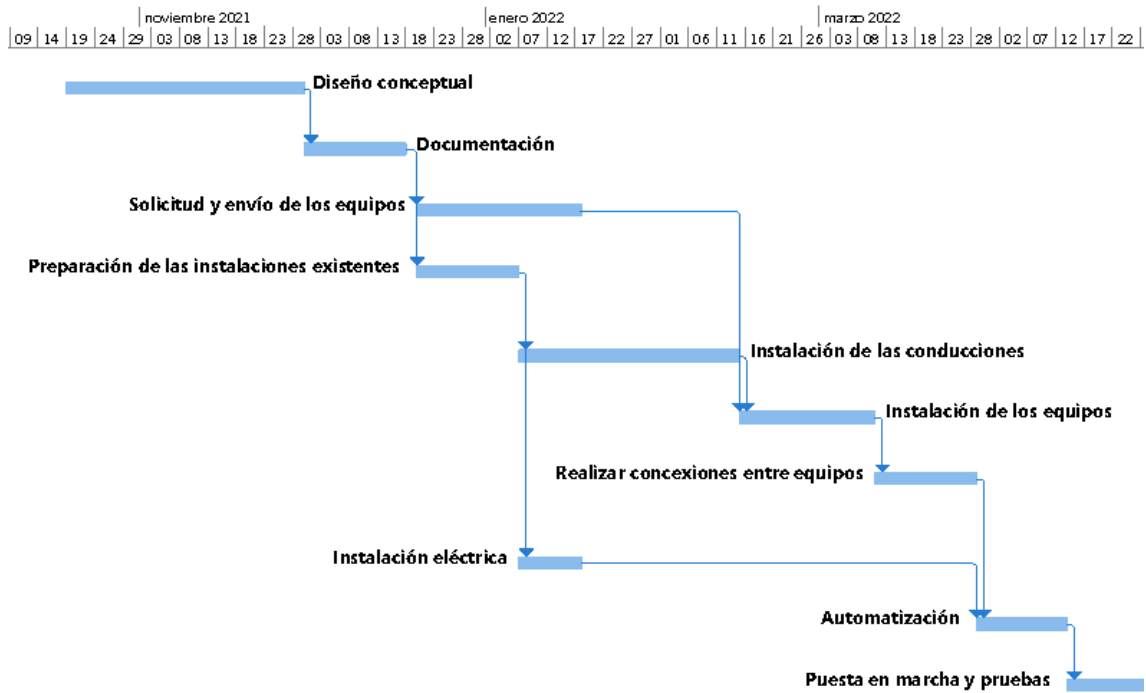


Figura M9.1 Diagrama de Gantt

10. ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS

Bajo la norma UNE 157001-2014, “Criterios generales para la elaboración de los documentos que constituyen un proyecto técnico”, el orden de prioridad establecido entre los diferentes documentos básicos del proyecto ha de ser el siguiente:

1. Planos
2. Pliego de Condiciones
3. Presupuesto
4. Memoria

11. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Dentro del estudio de viabilidad económica se recoge el conjunto de la información referida a la parte monetaria del proyecto. En base a dicha información se busca decidir la aceptación o rechazo del proyecto según las indicaciones de las tasas de rentabilidad.

Para la realización de dicho estudio, se ha considerado que la empresa de producción de baldosas subcontrata a una entidad externa para realizar la depuración de los gases contaminantes. La entidad le cobraría a la empresa un precio determinado por el tratamiento de los gases, según el coste del tratamiento de estos. [8]

11.1. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

Seguidamente se resumen las principales partes del presupuesto, las cuales son detalladas en el documento de *Presupuesto*.

El Presupuesto de Ejecución de Material (PEM) es el coste asociado a la construcción del proyecto, el cual suele ser representado como el 15 % del precio de los equipos. Esto se muestra en la *Tabla M11.1*.

Tabla M11.1 Presupuesto de Ejecución del Material

Elemento	Precio (€)
Equipos	93.441,80
Conducciones y accesorios	829,16
Mano de obra	14.016,27
PEM	108.287,23

La obtención del Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC), se realiza a partir de la obtención del PEM, para posteriormente, aplicarle un 20 % de gastos generales y un 6 % de beneficio industrial. Ver *Tabla M11.2*.

Tabla M11.2 Presupuesto de Ejecución por Contrata

Elemento	Precio (€)
PEM	108.287,23
Gastos generales (20 %)	21.657,45
Beneficio industrial (6 %)	6.497,23
PEC	136.441,91

El presupuesto total, equivalente a la inversión inicial del proyecto, se realiza aplicando un 7 % por la dirección y redacción de la obra y un 21 % correspondiente al IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido) al PEC ya calculado. En la *Tabla M11.3* se muestra el presupuesto total del sistema de depuración propuesto.

Tabla M11.3 Presupuesto total

Elemento	Precio (€)
PEC	136.441,91
Dirección y redacción de la obra (7 %)	9.550,93
IVA (21 %)	28.652,80
Presupuesto total	174.645,64

11.2. PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN

En el presupuesto de explotación se tienen el conjunto de gastos, normalmente anuales, de la instalación. En este se puede diferenciar entre gastos directos e indirectos.

11.2.1. GASTOS DIRECTOS

Para el sistema de depuración planteado, los gastos directos corresponden a la cantidad de reactivo necesario, coste de la gestión del residuo generado y el consumo eléctrico necesario en el sistema. Mediante la *Tabla M11.4* se muestra el resumen de gastos directos. Los cálculos se adjuntan en los *Anexos*.

Tabla M11.4 Gastos directos del sistema de depuración

Gasto directo	Consumo	Precio	Gasto (€/año)
Reactivo	4,20 kg/h	0,5 €/kg	16.632,00
Residuo	1,89 kg/h	0,23 €/kg	3.442,82
Electricidad	38,5 kW	0,35 €/(kW·h)	106.722,00
Total de gastos directos			126.796,82

11.2.2. GASTOS INDIRECTOS

Los gastos indirectos, a diferencia de los gastos directos, no tienen relación con el volumen de producción. En este caso, son aquellos gastos sin tener relación directa con el sistema de depuración o la cantidad de gases a tratar.

El principal gasto indirecto es el mantenimiento del sistema de depuración, limpieza de las mangas y el disponer de un operario a cargo del sistema de depuración. Se ha supuesto para esto, el contar con una persona a cargo de la limpieza de las mangas y un operario encargado de la supervisión y mantenimiento del correcto funcionamiento del sistema.

El responsable de limpieza tendrá la tarea de quitar las capas de polvo sobrantes posterior a la limpieza con chorro de aire y el operario verificar el correcto funcionamiento del sistema, pudiendo ser esta persona un trabajador de la misma planta. Las horas de trabajo de ambos trabajadores son reducidas para la magnitud de la corriente a depurar diaria.

Los sueldos y jornadas de trabajo se adjuntan en la *Tabla M11.5* vista a continuación, en donde se ha considerado que estos trabajan 300 días al año.

Tabla M11.5 Gastos indirectos del sistema de depuración

Gasto indirecto	Jornada laboral (h/día)	Sueldo (€/h)	Gasto (€/año)
Sueldo responsable limpieza	0,5	10	1.500,00
Sueldo operario	1	15	4.500,00
Total de gastos indirectos			6.000,00

Los gastos, tanto directos como indirectos, sufren variaciones con el paso del tiempo. Para determinar el gasto de un año concreto se utiliza la *Ecuación M11.1*.

$$G_n = G_0 \cdot \left(1 + \frac{IPC}{100}\right)^{n-1} \quad (M11.1)$$

Donde:

$G_n \equiv$ Gasto de un año concreto (€/año)

$G_0 \equiv$ Gasto del año inicial (€/año)

$IPC \equiv$ Índice de Precios al Consumo (%)

$n \equiv$ Número de años (años)

El valor del IPC junto a otros valores de interés para la realización de los diferentes apartados del estudio de viabilidad se recoge en la *Tabla M11.6* vista a continuación.

Tabla M11.6 Valores de parámetros necesarios para la viabilidad económica [21]

Concepto	Simbología	Unidad	Valor
Índice de Precios al Consumo	IPC	%	2,5
Interés nominal	i_n	%	3,0
Interés real	i_r	%	0,5

11.2.3. GASTOS TOTALES

Con la suma de los gastos directos e indirectos se pueden obtener los gastos totales. Teniendo así unos gastos totales de 132.796,82 €/año para el primer año.

Los gastos correspondientes al año dos o posteriores se calculan mediante la *Ecuación M11.1*.

11.2.4. AMORTIZACIÓN

Se le conoce a la amortización como la pérdida progresiva de valor que sufre cualquier bien físico con el paso del tiempo. Esto se ve compensado con el resguardo anual, para así, poder adquirir un nuevo equipo cuando uno se quede obsoleto.

Se puede determinar la amortización como el cociente de la inversión inicial y el horizonte o número de años para poder amortizar el gasto sufrido. Esto se puede ver mediante la *Ecuación M11.2*.

$$A = \frac{I_0}{H} \quad (M11.2)$$

Donde:

$A \equiv$ Amortización (€/años)

$I_0 \equiv$ Inversión inicial (€)

$H \equiv$ Horizonte temporal (años)

Aplicando dicha ecuación al caso estudiado, sabiendo que la inversión inicial coincide con el presupuesto total que es de 174.645,64 €/año y se ha fijado un horizonte de 10 años se obtiene la siguiente amortización.

$$A = \frac{174,645,64}{10} = 17.464,56 \text{ €}$$

11.2.5. INGRESOS

Los ingresos son la ganancias producidas a raíz de la actividad o servicio ofrecido. Mediante el pertinente cálculo, el cual se muestra en los *Anexos*, se ha estimado que se generan 0,056 € por cada metro cuadrado de producción de baldosas cerámicas de la empresa en cuestión.

Se ha supuesto así un valor de ingresos de 0,06 €/m² de producción de la empresa, cuya producción para el primer año es de 2.520.000 m². Obteniéndose así unos ingresos de 151.200 €/año. Los valores de los ingresos posteriores se calcularían mediante la *Ecuación M11.1*.

11.3. BENEFICIOS

Los beneficios son aquellas ganancias económicas que han de compensar las pérdidas para poder considerarse como tal. Existe el beneficio bruto y beneficio neto.

11.3.1. BENEFICIO BRUTO

Se define beneficio bruto como la diferencia de los ingresos y los gastos totales, junto a la amortización. Esto se muestra en la *Ecuación M11.3*.

$$B_B = IN - G_T - A \quad (M11.3)$$

Donde:

$$B_B \equiv \text{Beneficio bruto (€/año)}$$

$$IN \equiv \text{Ingresos (€/año)}$$

$$G_T \equiv \text{Gastos totales (€/año)}$$

11.3.2. BENEFICIO NETO

El beneficio neto es el beneficio bruto, pero descontándole a este último los impuestos, tal y como se puede ver en la *Ecuación M11.4*.

$$B_N = B_B - 0,25 \cdot B_B = 0,75 \cdot B_B \quad (M11.4)$$

Donde:

$$B_N \equiv \text{Beneficio neto (€/año)}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

A continuación, se muestra en la *Tabla M11.7* los valores correspondientes al beneficio bruto y neto obtenido con los valores descritos.

Tabla M11.7 Valores de beneficio bruto y neto obtenidos

Año	G _T (€/años)	A (€/años)	IN (€/años)	B _B (€/años)	B _N (€/años)
1	132796,8	17464,6	151200,0	938,6	704,0
2	136116,7	17464,6	154980,0	1398,7	1049,0
3	139519,7	17464,6	158854,5	1870,3	1402,7
4	143007,7	17464,6	162825,9	2353,6	1765,2
5	146582,8	17464,6	166896,5	2849,1	2136,8
6	150247,4	17464,6	171068,9	3356,9	2517,7
7	154003,6	17464,6	175345,6	3877,5	2908,1
8	157853,7	17464,6	179729,3	4411,0	3308,3
9	161800,0	17464,6	184222,5	4957,9	3718,4
10	165845,0	0	188828,1	22983,1	17237,3
11	169991,2	0	193548,8	23557,6	17668,2
12	174240,9	0	198387,5	24146,6	18109,9
13	178597,0	0	203347,2	24750,2	18562,7
14	183061,9	0	208430,9	25369,0	19026,7
15	187638,4	0	213641,6	26003,2	19502,4
16	192329,4	0	218982,7	26653,3	19990,0
17	197137,6	0	224457,2	27319,6	20489,7
18	202066,1	0	230068,7	28002,6	21002,0
19	207117,7	0	235820,4	28702,7	21527,0
20	212295,7	0	241715,9	29420,2	22065,2

Para el horizonte de 10 años previstos se observa que el primer año de actividad se generan beneficios, aunque estos sean muy pocos esto es debido principalmente a la inversión inicial.

Por otro lado, en el undécimo año los ingresos ascienden de forma considerada al haber cubierto el horizonte de la inversión inicial y tenerla ya amortizada.

11.4. FLUJO DE CAJA

Se comprende al flujo de caja como el dinero corriente disponible para la entidad gestora, encargada de la instalación, en todo momento. Ver *Ecuación M11.5*.

$$FC = B_N + A \quad (M11.5)$$

Donde:

$$FC \equiv \text{Flujo de caja (€/año)}$$

11.5. VALOR ACTUAL NETO

El Valor Actual Neto (VAN) sirve para ver la rentabilidad del proyecto, este se puede determinar con la *Ecuación M11.6* vista a continuación.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{\left(1 + \frac{i_r}{100}\right)^n} \quad (M11.6)$$

Donde:

$$VAN \equiv \text{Valor Actual Neto (€)}$$

$$i_r \equiv \text{Interés real (\%)}$$

Según el valor que tome el VAN se pueden dar distintas situaciones:

- 1) $VAN < 0$: Indicativo de que un proyecto no es rentable en cierto periodo de tiempo.
- 2) $VAN > 0$: Indicativo de que el proyecto es rentable en cierto periodo de tiempo.
- 3) $VAN = 0$: Indicativo de que el proyecto no genera ni ganancias ni pérdidas.

11.6. TASA INTERNA DE RENTABILIDAD

La Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) hace referencia al tanto por ciento de beneficio que una inversión supondrá en un horizonte concreto. Por tanto, al mayor ser este valor mayor será el indicativo de que un proyecto es rentable.

Este es calculando al igualar el valor del VAN a cero, tal y como se puede ver en la Ecuación M11.7.

$$0 = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{\left(1 + \frac{TIR}{100}\right)^n} \quad (M11.7)$$

Donde:

$$TIR \equiv \text{Tasa Interna de Rentabilidad (\%)}$$

11.7. PERIODO DE RETORNO

El Periodo de Retorno (PR) marca el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial del proyecto. Para entender mejor este concepto, se muestra la Ecuación M11.8 y la Ecuación M11.9.

$$P = I_0 - \sum_1^Q FC \quad (M11.8)$$

$$PR = Q + \frac{P}{FC \text{ del año siguiente a } Q} \quad (M11.9)$$

Donde:

$PR \equiv$ Periodo de retorno (años)

$Q \equiv$ Año anterior a que $P < 0$ (años)

Se procede a mostrar ahora los valores obtenidos en cuanto al VAN, TIR y PR. Estos se recopilan en la *Tabla M11.8*.

Tabla M11.8 Valores obtenidos

Concepto	Valor
Valor Actual Neto (VAN)	201.201,5 €
Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)	9,3 %
Periodo de Retorno (PR)	8,9 años

Con el valor del VAN obtenido, al ser este positivo, se puede considerar que el proyecto llegaría a ser rentable en el periodo de tiempo supuesto.

La rentabilidad del proyecto, sin llegar a ser una muy elevada, considerando que la actividad está basada en depuración de corrientes contaminantes resulta ser una bastante aceptable.

Respecto al periodo de retorno, la inversión inicial se recuperaría un año antes del horizonte de 10 años supuesto, siendo el año siguiente al horizonte aquel en donde los beneficios comenzarían a ser más elevados.

11.8. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

La finalidad de este estudio es simplemente demostrar que este tipo de tratamiento puede llegar a ser rentable, puesto que, el sistema de depuración está planteado para poder respetar el medio ambiente y no el buscar un beneficio económico. Aún así, se ha podido comprobar que, para las suposiciones tomadas, este tipo de actividad puede llegar a producir beneficios bastantes satisfactorios a largo plazo.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Comentar el hecho de que los valores tomados para el IPC y el interés nominal fueron tomados en un periodo cercano a la realización de la parte final de este proyecto, por tanto, estos son influenciados por las situaciones económicas de la actualidad. Los resultados obtenidos podrían ser unos distintos en otro tipo de escenario o en años distintos a la realización de este proyecto.

En cuanto al precio de la electricidad, este supone el gran aumento de los gastos directos del proyecto. El precio tomado es la media de las últimas semanas contempladas a la hora de realizar los cálculos, pudiendo condicionar este a que los resultados obtenidos sean distintos en un futuro si este precio cambia.

3. ANEXOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

1. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA	1
1.1. REFERENCIAS DE LOS HORNOS	1
1.2. AUTORIZACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA	6
2. PASAR DE CONDICIONES NORMALES A REFERENCIA	7
3. TEMPERATURA DE DEW POINT	10
4. DIÁMETRO DE LAS CONDUCCIONES	15
4.1. DIÁMETRO DEL TRAMO 1	23
4.2. DIÁMETRO DEL TRAMO 2	25
4.3. DIÁMETRO DEL TRAMO 3 Y 4	26
4.4. DIÁMETRO DEL TRAMO 5	27
5. PÉRDIDAS DE CALOR	30
5.1. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 1	39
5.2. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 2	42
5.3. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 3	42
5.4. TEMPERATURA A LA SALIDA DEL FILTRO	46
5.4.1. PAREDES VERTICALES	48
5.4.2. PAREDES HORIZONTALES	49
5.4.3. TEMPERATURA DE SALIDA DEL FILTRO	49
5.5. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 4	50
5.6. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 5	53

6. PÉRDIDAS DE CARGA	57
6.1. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 1	63
6.2. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 2	65
6.3. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 3	66
6.4. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 4	68
6.5. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 5	68
7. EQUIPOS DE DEPURACIÓN	70
7.1. MATERIAL DE LAS MANGAS	70
7.2. MÉTODO DE LIMPIEZA DE LAS MANGAS	71
7.3. CARACTERIZACIÓN DEL FILTRO DE MANGAS	72
7.3.1. NÚMERO DE MANGAS A INSTALAR	72
7.3.2. PÉRDIDAS DE CARGA DEL FILTRO DE MANGAS	74
8. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LOS VENTILADORES	77
8.1. VENTILADORES AL INICIO DEL SISTEMA	77
8.2. VENTILADOR AL FINAL DEL SISTEMA	77
9. CÁLCULOS PARA LA SELECCIÓN DEL REACTIVO	78
9.1. CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÁSICOS A APORTAR	78
9.1.1. CAUDAL MÁSICO PURO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO	78
9.1.2. CAUDAL MÁSICO PURO DE BICARBONATO DE SODIO	82
9.2. CÁLCULO DEL RESIUDO FORMADO	84
9.2.1. RESIDUO FORMADO POR EL HIDRÓXIDO DE CALCIO	84
9.2.2. RESIDUO FORMADO POR EL BICARBONATO DE SODIO	86

9.3. CÁLCULO DEL COSTE ASOCIADO A CADA REACTIVO	87
9.3.1. COSTE ASOCIADO AL USO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO	88
9.3.2. COSTE ASOCIADO AL USO DE BICARBONATO DE SODIO	88
10. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DEL SILO	89
11. CÁLCULO DE LA CORRIENTE DEPURADA	91
12. ESTUDIO ECONÓMICO	93
12.1. COSTE DE LA INSTALACIÓN	93
12.1.1. COSTE DE LAS CONDUCCIONES Y ACCESORIOS	93
12.1.2. COSTE DEL SILO Y TORNILLO DOSIFICADOR	94
12.1.3. COSTE DE LAS MANGAS	94
12.1.4. COSTE DE LA INFRAESTRUCTURA DEL FILTRO	95
12.1.5. COSTE DEL MÉTODO DE LIMPIEZA	96
12.1.6. COSTE DE LOS VENTILADORES	96
12.1.7. COSTE DE LOS CONTROLADORES	96
12.1.8. COSTE TOTALES DE LA INSTALACIÓN	96
12.2. COSTE DE OPERACIÓN	97
12.2.1. COSTE DEL REACTIVO UTILIZADO	97
12.2.2. COSTE GESTIÓN DEL RESIDUO	97
12.2.3. COSTE ELÉCTRICO	98
12.2.4. COSTE TOTAL DE OPERACIÓN ANUAL	98
12.3. COSTE TOTAL	98
13. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD	100

1. DOCUMENTACIÓN DE PARTIDA

1.1. REFERENCIAS DE LOS HORNOS

A continuación, se procede a describir las especificaciones de los hornos utilizados para el estudio en cuestión. Dicha información ha sido facilitada por la empresa Fabresa.

Las chimeneas provenientes de los cuatro hornos son de un mismo fabricante, donde los parámetros más significativos se pueden observar en la *Figura A1.1*.

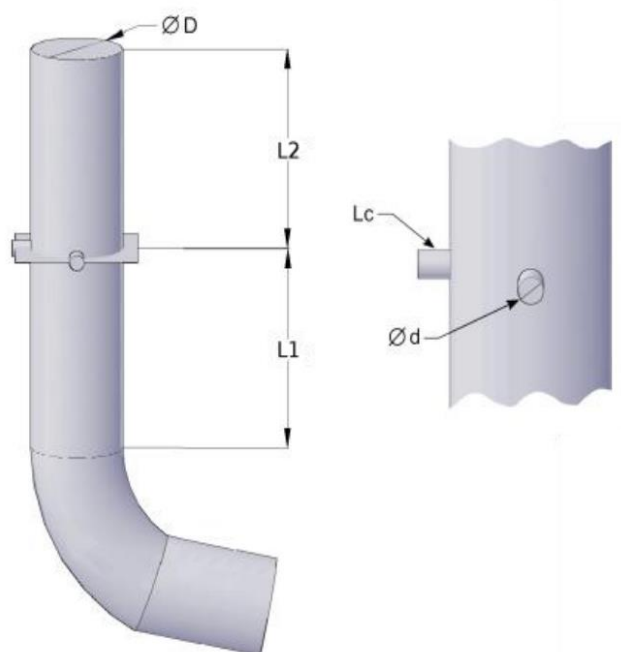


Figura A1.1 Parámetros a tener en consideración para las chimeneas de los hornos

Seguidamente, se procede a recopilar la información más significativa en torno a los hornos empleados para el proceso de producción y las especificaciones de sus chimeneas de salida de contaminantes.

La información es reestructura en forma de tabla, donde la *Tabla A1.1* y *Tabla A1.2*, corresponden a los dos hornos de productos sin esmaltar. Por otro lado, la *Tabla A1.3* y *Tabla A1.4* corresponden a los hornos de producto esmaltado.

Tabla A1.1 Especificaciones del horno 1 de producto sin esmaltar

Especificación	Unidades	Significado
Marca y modelo	-	SACMI RKS 1650/71,4
Combustible utilizado	-	Gas natural
Tipo de proceso	-	Cocción piezas cerámicas
Formato de las piezas	cm ²	15x15
Temperatura	°C	161
Presión	kPa	94,44
Humedad gas	kg/Nm ³	0,0378
Distancia superior [L2]	m	3
Distancia inferior [L1]	m	3,5
Geometría de la chimenea	-	Circular
Diámetro chimenea [D]	m	0,63
Longitud casquillo [Lc]	m	0,1
Diámetro orificio [d]	m	0,1
Método de acceso	-	Plataforma fija

Tabla A1.2 Especificaciones del horno 2 de producto sin esmaltar

Especificación	Unidades	Significado
Marca y modelo	-	SACMI RKS 1450/71,4
Combustible utilizado	-	Gas natural
Tipo de proceso	-	Cocción piezas cerámicas
Formato de las piezas	cm ²	15x15
Temperatura	°C	161
Presión	kPa	94.01
Humedad gas	kg/Nm ³	0,0346
Distancia superior [L2]	m	2
Distancia inferior [L1]	m	3
Geometría de la chimenea	-	Circular
Diámetro chimenea [D]	m	0,63
Longitud casquillo [Lc]	m	0,1
Diámetro orificio [d]	m	0,1
Método de acceso	-	Plataforma fija

Tabla A1.3 Especificaciones del horno 3 de producto esmaltado

Especificación	Unidades	Significado
Marca y modelo	-	SACMI RKS 2070
Combustible utilizado	-	Gas natural
Tipo de proceso	-	Cocción piezas cerámicas
Formato de las piezas	cm ²	15x15
Temperatura	°C	149
Presión	kPa	94,90
Humedad gas	kg/Nm ³	0,0329
Distancia superior [L2]	m	4
Distancia inferior [L1]	m	4
Geometría de la chimenea	-	Circular
Diámetro chimenea [D]	m	0,63
Longitud casquillo [Lc]	m	0,1
Diámetro orificio [d]	m	0,1
Método de acceso	-	Plataforma fija

Tabla A1.4 Especificaciones del horno 4 de producto esmaltado

Especificación	Unidades	Significado
Marca y modelo	-	SACMI RKS 2070
Combustible utilizado	-	Gas natural
Tipo de proceso	-	Cocción piezas cerámicas
Formato de las piezas	cm ²	15x15
Temperatura	°C	145
Presión	kPa	94,32
Humedad gas	kg/Nm ³	0,0341
Distancia superior [L2]	m	3,5
Distancia inferior [L1]	m	6
Geometría de la chimenea	-	Circular
Diámetro chimenea [D]	m	0,63
Longitud casquillo [Lc]	m	0,1
Diámetro orificio [d]	m	0,1
Método de acceso	-	Plataforma fija

1.2. AUTORIZACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA

Se detallan ahora los niveles de emisión para diferentes contaminantes los cuales están fijados en la Resolución de 4 de noviembre de 2010, de la Dirección General para el Cambio Climático, por la que se le otorga a la empresa FABRICACIÓN ESPAÑOLA SANITARIA, S.A. (Fabresa), la autorización ambiental integrada para una industria de fabricación de productos cerámicos mediante horneado.

Se muestra en la *Tabla A1.5* los valores pertinentes, expresados estos en las condiciones de referencia (1 atm, 273 K y 18% en contenido de oxígeno).

Tabla A1.5 Autorización Ambiental Integrada

FOCO	CONTAMINANTE	LÍMITES	PERIODICIDAD
Hornos	Partículas	30 mg/Nm ³	Q < 30.000 Nm ³ /h: Bienal Q > 30.000 Nm ³ /h: Anual
	NO _x (expresado como NO ₂)	250 mg/Nm ³	
	SO _x (expresado como SO ₂)	200 mg/Nm ³	
	Fluoruros (en gases, expresados como HF)	10 mg/Nm ³	
Corrientes de aspiración	Partículas	30 mg/Nm ³	Q < 10.000 Nm ³ /h: Trienal 10.000 Nm ³ < Q < 30.000 Nm ³ /h: Bienal Q > 30.000 Nm ³ /h: Anual

2. PASAR DE CONDICIONES NORMALES A REFERENCIA

Se detallan a continuación las conversiones necesarias para tener los valores de los parámetros utilizados en las adecuadas condiciones de referencia y poder ver así si estas cumplen con la legislación vigente.

Se han utilizado de esta forma, la *Ecuación A2.1* para obtener el caudal en las condiciones de referencia y paralelamente, la *Ecuación A2.2* para obtener la concentración en las condiciones de referencia.

$$Q_{v_{REF}} = Q_v \cdot (1 - x_w) \cdot \frac{T_N}{T_C} \cdot \frac{P_C}{P_N} \cdot \frac{(0,21 - x_{O_2})}{(0,21 - x_{O_2_{REF}})} \quad (A2.1)$$

$$C_{REF} = C_m \cdot \frac{1}{(1 - x_w)} \cdot \frac{T_C}{T_N} \cdot \frac{P_N}{P_C} \cdot \frac{(0,21 - x_{O_2_{REF}})}{(0,21 - x_{O_2})} \quad (A2.2)$$

Donde:

$Q_v \equiv$ Caudal volumétrico (m^3/h) o (Nm^3/h)

$x_w \equiv$ Contenido en humedad (%)

$T \equiv$ Temperatura (K)

$P \equiv$ Presión (kPa)

$x_{O_2} \equiv$ Fracción de oxígeno (%)

- Horno 1: Cocción de producto sin esmaltar

$$Q_{v_{REF}} = 2801 \cdot (1 - 0,05) \cdot \frac{273}{(273 + 161)} \cdot \frac{94,44}{101,325} \cdot \frac{(0,21 - 0,168)}{(0,21 - 0,18)} = 4046 \frac{Nm^3}{h}$$

$$C_{HF_{REF}} = 38,3 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,44} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,168)} = 48,8 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{HCl_{REF}} = 3,3 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,44} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,168)} = 4,2 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{NO_xREF} = 22,5 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,44} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,168)} = 28,7 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{SO_2REF} = 9,1 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,44} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,168)} = 11,5 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{PTREF} = 1,6 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,44} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,168)} = 2,1 \frac{mg}{Nm^3}$$

- Horno 2: Cocción de producto sin esmaltar

$$Q_{vREF} = 5300 \cdot (1 - 0,05) \cdot \frac{273}{(273 + 161)} \cdot \frac{94,01}{101,325} \cdot \frac{(0,21 - 0,161)}{(0,21 - 0,18)} = 4771 \frac{Nm^3}{h}$$

$$C_{HFREF} = 14,4 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,01} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,161)} = 16,0 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{HClREF} = 3,4 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,01} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,161)} = 3,8 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{NO_xREF} = 20,4 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,01} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,161)} = 22,7 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{SO_2REF} = 9,4 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,01} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,161)} = 10,5 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{PTREF} = 0,9 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 161)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,01} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,161)} = 1,0 \frac{mg}{Nm^3}$$

- Horno 3: Cocción de producto esmaltado

$$Q_{vREF} = 4256 \cdot (1 - 0,05) \cdot \frac{273}{(273 + 149)} \cdot \frac{94,90}{101,325} \cdot \frac{(0,21 - 0,172)}{(0,21 - 0,18)} = 3076 \frac{Nm^3}{h}$$

$$C_{HFREF} = 2,5 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 149)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,90} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,172)} = 3,5 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{HCl_{REF}} = 0,2 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 149)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,90} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,172)} = 0,3 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{NOx_{REF}} = 23,1 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 149)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,90} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,172)} = 32,0 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{SO2_{REF}} = 8,6 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 149)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,90} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,172)} = 11,9 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{PT_{REF}} = 1,5 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 149)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,90} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,172)} = 2,1 \frac{mg}{Nm^3}$$

- Horno 4: Cocción de producto esmaltado

$$Q_{V_{REF}} = 10090 \cdot (1 - 0,05) \cdot \frac{273}{(273 + 145)} \cdot \frac{94,32}{101,325} \cdot \frac{(0,21 - 0,175)}{(0,21 - 0,18)} = 6858 \frac{Nm^3}{h}$$

$$C_{HF_{REF}} = 3,0 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 145)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,32} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,175)} = 4,1 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{HCl_{REF}} = 0,2 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 145)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,32} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,175)} = 0,3 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{NOx_{REF}} = 22,1 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 145)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,32} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,175)} = 28,0 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{SO2_{REF}} = 10,8 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 145)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,32} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,175)} = 14,8 \frac{mg}{Nm^3}$$

$$C_{PT_{REF}} = 1,7 \cdot \frac{1}{(1 - 0,05)} \cdot \frac{(273 + 145)}{273} \cdot \frac{101,325}{94,32} \cdot \frac{(0,21 - 0,18)}{(0,21 - 0,175)} = 2,3 \frac{mg}{Nm^3}$$

3. TEMPERATURA DE DEW POINT

A la hora de diseñar un sistema de depuración es muy importante que la temperatura de entrada a los equipos de depuración sea una que no llegue a ocasionar daños en estos mismos.

El *acid dew point* hace referencia a la temperatura bajo la cual los ácidos comienzan a condensarse, dicha temperatura siendo la indicativa de la posible corrosión que se pueda llevar a cabo .

Para determinar esta temperatura se suelen utilizar ecuaciones empíricas en función de los compuestos presentes en la corriente a tratar, los cuales son aquellos que puedan llegar a dañar el equipo depurador.

Al ser el sistema de depuración propuesto enfocado mayoritariamente a la depuración de contaminante fluorado, presente como HF, se puede determinar la temperatura según la *Ecuación A3.1* [4].

$$\frac{1000}{T_{DP_{HF}}} = [3,8503 - 0,1728 \cdot A - 0,02398 \cdot B + 0,001135 \cdot A \cdot B] \quad (A3.1)$$

Donde:

$$A \equiv \ln(p_{H_2O})$$

$$B \equiv \ln(p_{HF})$$

$$T_{DP_{HF}} \equiv \text{Temperatura del acid dew point del HF (K)}$$

$$p_{H_2O} \equiv \text{Presión parcial del agua (mmHg)}$$

$$p_{HF} \equiv \text{Presión parcial del HF (mmHg)}$$

Para la obtención de la presión parcial del HF se ha supuesto el caso de que la concentración de contaminantes a la salida de los hornos sea de 40 mg/m³ y se ha empleado para ello la ley de los gases ideales.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

En primera instancia, es necesario pasar las unidades de la concentración de HF a unas coherentes para realizar el cálculo.

$$c_{HF} = 40 \frac{mg}{m^3} \cdot \frac{1 g}{1000 mg} \cdot \frac{1 mol}{20 g} \cdot \frac{1 m^3}{1000 dm^3} \cdot \frac{1 dm^3}{1 l} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{l}$$

Se puede ahora aplicar la ley de los gases ideales, reestructurando la formula tal y como se ve en la *Ecuación A3.2*.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$p = \frac{n}{V} \cdot R \cdot T$$

$$p = c \cdot R \cdot T \tag{A3.2}$$

Donde:

$p \equiv$ Presión parcial del gas (atm)

$V \equiv$ Volumen del gas (l)

$n \equiv$ Número de moles del gas (mol)

$R \equiv$ Constante universal de los gases ideales ($l \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

$T \equiv$ Temperatura del gas (K)

$c \equiv$ Concentración del gas (mol/l)

Se muestra a continuación el desarrollo del cálculo propuesto para obtener la presión de HF, para utilizarla luego en la ecuación empírica. El valor de R para el sistema de unidades propuesto toma un valor de 0,082.

$$p_{HF} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,082 \cdot (161 + 273) = 71,176 \cdot 10^{-6} atm = 0,054 mmHg$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

La obtención de la presión del agua se calcula mediante la *Ecuación A3.3* detallada a continuación.

$$p_{H_2O} = \frac{H}{100} \cdot P \quad (A3.3)$$

Donde:

$p_{H_2O} \equiv$ Presión parcial del agua (mmHg)

$H \equiv$ Porcentaje en humedad (%)

$P \equiv$ Presión absoluta (mmHg)

Considerando que la humedad a la salida de los hornos de cocción es aproximadamente del 3,5 % y el valor de la presión absoluta sería la atmosférica, es decir, 760 mmHg es posible estimar la presión parcial del agua tal y como se muestra a continuación.

$$p_{H_2O} = \frac{3,5}{100} \cdot 760 = 26,6 \text{ mmHg}$$

De esta forma ya se pueden sustituir las presiones en la *Ecuación A3.1* para obtener la temperatura deseada.

$$A = \ln(26,6) = 3,281$$

$$B = \ln(0,054) = -2,919$$

$$\frac{1000}{T_{DPHF}} = [3,8503 - 0,1728 \cdot 3,281 + 0,02398 \cdot 2,919 - 0,001135 \cdot 3,281 \cdot 2,919]$$

$$T_{DPHF} = \frac{1000}{[3,8503 - 0,1728 \cdot 3,281 + 0,02398 \cdot 2,919 - 0,001135 \cdot 3,281 \cdot 2,919]}$$

$$T_{DPHF} = 299,2 \text{ K} = 26,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Se obtiene de esta forma que la temperatura de *dew point* del HF sería en torno a los 26 °C. Esta temperatura es indicativa de que no se producirán posibles efectos corrosivos durante la depuración a causa de la temperatura y la caracterización de la corriente.

Análogamente se pueden aplicar distintas ecuaciones empíricas [4] para el resto de los contaminantes de la corriente a depurar. Teniendo la *Ecuación A3.4* para el HCl, la *Ecuación A3.5* para el SO₂ y *Ecuación A3.6* para el NO₂.

$$\frac{1000}{T_{DP_{HCl}}} = [3,7368 - 0,1591 \cdot A - 0,0326 \cdot C + 0,00269 \cdot A \cdot C] \quad (A3.4)$$

$$\frac{1000}{T_{DP_{SO_2}}} = [3,9526 - 0,1863 \cdot A - 0,000867 \cdot D + 0,000913 \cdot A \cdot D] \quad (A3.5)$$

$$\frac{1000}{T_{DP_{NO_2}}} = [3,6614 - 0,1446 \cdot A - 0,0827 \cdot E + 0,00756 \cdot A \cdot E] \quad (A3.6)$$

Donde:

$$C \equiv \ln(p_{HCl})$$

$$D \equiv \ln(p_{SO_2})$$

$$E \equiv \ln(p_{NO_2})$$

Utilizando las transformaciones descritas anteriormente, aplicadas para cada uno de los compuestos, es posible determinar la temperatura de *acid dew point*.

Se han considerado una aproximación de los valores obtenidos a la salida de los dos hornos de cocción en condiciones normales para los cálculos. Los resultados se pueden ver en la *Tabla A3.1*.

Tabla A3.1 Temperaturas de acid dew point para los contaminantes a depurar

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

	c (mg/m ³)	c · 10 ⁶ (mol/l)	p _{H₂O} (mmHg)	p _x · 10 ⁶ (atm)	p _x (mmHg)	T _{DP} (°C)
HF	40	2,0000	26,6	71,176	0,05409	26,2
HCl	4	0,1096	26,6	3,900	0,00296	25,2
SO ₂	10	0,1562	26,6	5,561	0,00422	27,3
NO ₂	25	0,5435	26,6	19,341	0,01470	18,4

Se ha podido asegurar de esta forma que la temperatura de entrada al filtro de mangas no podría llegar ocasionar deterioros o posibles efectos corrosivos en el equipo, debido principalmente a las bajas temperaturas de *dew point* que presentan los contaminantes en el interior de la corriente.

En caso de que las temperaturas obtenidas fueran muy superiores, se tendría que plantear el diseño del sistema, para que la temperatura de entrada al filtro de mangas sea una que no ocasione posibles deterioros en el equipo y por consecuencia, en la totalidad del sistema de depuración.

4. DIÁMETRO DE LAS CONDUCCIONES

En este apartado se procede a detallar los diversos cálculos realizados para la obtención de los diferentes diámetros de las conducciones.

Para los cálculos, se ha considerado que debido a las bajas pérdidas de presión y que el fluido opera aproximadamente a presión atmosférica, la corriente gaseosa se comporta como un líquido. Es por ello, por lo que ha sido utilizado el caudal volumétrico para los diversos cálculos de este apartado.

Los cálculos se realizaron separando por tramos las distintas etapas del sistema de depuración, siendo estos los siguientes:

- Tramo 1: Salida del primer horno hasta la unión con la corriente saliente del segundo horno.
- Tramo 2: Salida del segundo horno hasta la unión con la corriente saliente del primer horno.
- Tramo 3: Posterior a la unión de las dos corrientes procedentes de los dos hornos, hasta el filtro de mangas.
- Tramo 4: Desde la salida del filtro de mangas hasta la etapa de dilución final.
- Tramo 5: Desde la etapa de dilución final al exterior.

El dimensionamiento de las conducciones para el sistema ha sido planteado utilizando diámetros de tuberías estándar de acero al carbono, con la finalidad de ahorrar costes.

De esta forma, el procedimiento seguido fue el de calcular la velocidad del fluido que circularía por dentro de las conducciones, de los diferentes tramos planteados, con diámetros estándar y seleccionar la óptima en cada caso.

Para la elección de la velocidad de referencia, se tomó en consideración la aplicación BOE-A-1980-23974 donde se limita la velocidad máxima de circulación de gases por conducciones a 30 m/s.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Se ha visto prudente el emplear una velocidad superior de 18 m/s, considerando un intervalo de 18-23 m/s para la obtención de los diferentes diámetros. Esto es debido a que el reactivo es alimentado en forma de partículas sólidas micronizadas y para evitar que estas sedimenten dentro del conducto se requieren velocidades superiores a 18 m/s.

La ecuación de la velocidad de circulación viene dada por el cociente del caudal volumétrico real del gas y su área. Ver *Ecuación A4.1*.

$$v = \frac{Q_{vR}}{A} \quad (A4.1)$$

Donde:

$v \equiv$ Velocidad del fluido (m/s)

$Q_{vR} \equiv$ Caudal volumétrico real del fluido (m³/s)

$A \equiv$ Área de la conducción (m²)

Es posible expresar el área en función del diámetro interno de la conducción al saber que se trata de una conducción cilíndrica, se tiene de esta forma la *Ecuación A4.2*.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \quad (A4.2)$$

Donde:

$D_i \equiv$ Diámetro interno de la conducción cilíndrica (m)

Combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene la *Ecuación A4.3*, la cual relaciona la velocidad en función del caudal real del gas y el diámetro interno de la conducción.

$$v = \frac{4 \cdot Q_{vR}}{\pi \cdot D_i^2} \quad (A4.3)$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Como las corrientes salientes del horno tienden a tener una temperatura más alta que la indicada a introducir al filtro de mangas, se deben utilizar corrientes secundarias de aire para diluir y evitar problemas de funcionamiento.

Se plantea así un balance de energía entre la corriente saliente del horno y una corriente capaz de diluir esta última, obsérvese la *Ecuación A4.4*.

$$m_h \cdot C_{p_h} \cdot \Delta T_h + m_d \cdot C_{p_d} \cdot \Delta T_d = m_f \cdot C_{p_f} \cdot \Delta T_f \quad (A4.4)$$

Donde la definición del caudal másico se puede expresar como el producto del caudal volumétrico con el que se pretende operar y su respectiva densidad, ver la *Ecuación A4.5*.

$$m = Q_v \cdot \rho \quad (A4.5)$$

Combinando estas últimas dos ecuaciones y considerando despreciable las temperaturas iniciales de los diferentes diferenciales de temperatura, se obtiene la *Ecuación A4.6*.

$$Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_h - T_{h_0}) + Q_{v_d} \cdot \rho_d \cdot C_{p_d} \cdot (T_d - T_{d_0}) = Q_{v_f} \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_f - T_{f_0})$$
$$Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} \cdot T_h + Q_{v_d} \cdot \rho_d \cdot C_{p_d} \cdot T_d = Q_{v_f} \cdot \rho_f \cdot C_{p_f} \cdot T_f \quad (A4.6)$$

Para la obtención del caudal volumétrico de dilución, se considera que los caudales volumétricos con proporcionales, junto a la densidad y el calor específico. De esta forma, es posible reescribir la ecuación anterior tal y como se puede ver en la *Ecuación A4.7*, para determinar el caudal volumétrico de aire para diluir.

$$Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} \cdot T_h + Q_{v_d} \cdot \rho_d \cdot C_{p_d} \cdot T_d = (Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} + Q_{v_d} \cdot \rho_d \cdot C_{p_d}) \cdot T_f$$
$$Q_{v_d} = \frac{Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} \cdot T_f - Q_{v_h} \cdot \rho_h \cdot C_{p_h} \cdot T_h}{\rho_d \cdot C_{p_d} \cdot T_d - \rho_d \cdot C_{p_d} \cdot T_f} \quad (A4.7)$$

Donde:

$m_h \equiv$ Caudal másico real de los gases (kg/s)

$C_{p_h} \equiv$ Calor específico del gas (J/(kg · K))

$\Delta T_h \equiv$ Diferencial de temperatura de los gases (K)

$Q_{v_h} \equiv$ Caudal volumétrico real de los gases (m³/s)

$\rho_h \equiv$ Densidad real del gas (kg/m³)

$T_h \equiv$ Temperatura real de los gases (K)

$T_{h_0} \equiv$ Temperatura inicial real de los gases (K)

$m_d \equiv$ Caudal másico del aire (kg/s)

$C_{p_d} \equiv$ Calor específico del aire (J/(kg · K))

$\Delta T_d \equiv$ Diferencial de temperatura del aire (K)

$Q_{v_d} \equiv$ Caudal volumétrico de aire (m³/s)

$\rho_d \equiv$ Densidad del aire (kg/m³)

$T_d \equiv$ Temperatura del aire (K)

$T_{d_0} \equiv$ Temperatura inicial del aire (K)

$m_f \equiv$ Caudal másico resultante (kg/s)

$C_{p_f} \equiv$ Calor específico resultante (J/(kg · K))

$\Delta T_f \equiv$ Diferencial de la temperatura resultante (K)

$Q_{v_f} \equiv$ Caudal volumétrico resultante (m³/s)

$\rho_f \equiv$ Densidad resultante (kg/m³)

$T_f \equiv$ Temperatura resultante (K)

$T_{d_0} \equiv$ Temperatura inicial resultante (K)

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

La densidad resultante puede llegar a sufrir pequeñas variaciones debido a la dilución, es posible determinar su nuevo valor mediante la *Ecuación A4.8* vista a continuación.

$$Q_{v_h} \cdot \rho_h + Q_{v_d} \cdot \rho_d = Q_{v_f} \cdot \rho_f$$
$$\rho_f = \frac{Q_{v_h} \cdot \rho_h + Q_{v_d} \cdot \rho_d}{Q_{v_f}} \quad (A4.8)$$

Es posible determinar el calor específico de los humos mediante la norma UNE-EN 1338-1:2016 a partir de la temperatura media de los humos. Esto se muestra seguidamente en la *Ecuación A4.9*.

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot T_{hm} - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot T_{hm}^2 \quad (A4.9)$$

Donde:

$$T_{hm} \equiv \text{Temperatura media de los humos (K)}$$

Por otro lado, la densidad para los humos se puede calcular por medio de la ley de gases ideales, donde por medio de las transformaciones adecuadas es posible estimar la densidad según la *Ecuación A4.10*.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$
$$P \cdot V = \frac{m}{PM} \cdot R \cdot T$$
$$\frac{P \cdot PM}{R \cdot T} = \frac{m}{V}$$
$$\rho = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T} \quad (A4.10)$$

Donde:

$P \equiv$ Presión del gas (atm)

$V \equiv$ Volumen (m^3)

$n \equiv$ Número de moles del gas (kmol)

$R \equiv$ constante universal de los gases ideales ($m^3 \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot kmol^{-1}$)

$T \equiv$ Temperatura del gas (K)

$m \equiv$ Número másico del gas (kg)

$PM \equiv$ Peso molecular del gas (kg/kmol)

$\rho \equiv$ Densidad del gas (kg/m^3)

Dentro de la formula se puede utilizar una atmósfera de presión, 0,082 para la constante R, la temperatura de la corriente utilizada y el peso molecular para la corriente húmeda de contaminante se puede estimar mediante la Ecuación A4.11.

$$PM_h = x_{CO_2} \cdot PM_{CO_2} + x_{O_2} \cdot PM_{O_2} + x_{N_2} \cdot PM_{N_2} + x_{H_2O} \cdot PM_{H_2O} \quad (A4.11)$$

Donde:

$PM_h \equiv$ Peso molecular de la corriente de humos (kg/kmol)

$PM_{CO_2} \equiv$ Peso molecular del dióxido de carbono (kg/kmol)

$x_{CO_2} \equiv$ Fracción de dióxido de carbono (%)

$PM_{O_2} \equiv$ Peso molecular del oxígeno (kg/kmol)

$x_{O_2} \equiv$ Fracción de oxígeno (%)

$PM_{N_2} \equiv$ Peso molecular del nitrógeno (kg/kmol)

$x_{N_2} \equiv$ Fracción de nitrógeno (%)

$PM_{H_2O} \equiv$ Peso molecular del agua (kg/kmol)

$x_{H_2O} \equiv$ Fracción del agua (%)

Paralelamente, para la corriente de aire seco es posible utilizar tablas de propiedades del aire seco a presión atmosférica. Ver *Tabla A4.1*.

Tabla A4.1 Propiedades del aire seco a presión atmosférica [10]

T (°C)	ρ (kg/m ³)	C _P (J/(kg·K))	$\mu \cdot 10^6$ (Pa·s)
15	1,225	1007	18,02
20	1,204	1007	18,25
25	1,184	1007	18,49
30	1,164	1007	18,72
35	1,146	1007	18,95

A partir de las ecuaciones deducidas, es posible determinar los caudales volumétricos y las densidades reales de los gases de dentro de las conducciones.

Posteriormente, se puede suponer un diámetro estándar para la conducción y determinar así la velocidad de la corriente, para ver así cuáles son las velocidades que se ajustan a los intervalos de velocidades fijados para cada tramo (18-23 m/s).

Si una velocidad está en el intervalo deseado, se seleccionaría el respectivo diámetro supuesto para el diseño de las conducciones. En caso de tener varias velocidades dentro del intervalo, se seleccionaría la óptima considerando que velocidad limita más con los extremos del intervalo.

Los diámetros estándar supuestos serán tomados a partir de la *Tabla A4.2*, los cuales servirán para el cálculo de las diferentes velocidades y ver la cuál es la óptima en función del diámetro. Estos provienen de un catálogo comercial.

Tabla A4.2 Diámetros externos e internos estándar [11]

D_e (in)	D_e (m)	D_i (in)	D_i (m)
3,555	0,090	3,339	0,085
4,346	0,110	4,079	0,104
4,937	0,125	4,638	0,118
5,531	0,141	5,205	0,132
6,319	0,161	5,988	0,152
7,898	0,201	7,484	0,190
8,886	0,226	8,421	0,214
9,874	0,251	9,354	0,238
12,441	0,316	11,787	0,299
14,020	0,356	13,283	0,337
15,795	0,401	14,968	0,380
17,772	0,451	16,839	0,428
19,744	0,502	18,709	0,475
24,878	0,632	23,575	0,599
28,031	0,712	26,567	0,675
31,575	0,802	29,937	0,760
35,539	0,903	33,677	0,855
39,488	1,003	37,421	0,951
43,437	1,103	41,161	1,046
47,386	1,204	44,905	1,141

4.1. DIÁMETRO DEL TRAMO 1

Para este primer tramo se tiene que la temperatura media saliente del primer horno de cocción es de 161 °C, pese a esto, se va a considerar una temperatura superior en torno a los 170 °C para los cálculos. Dicha consideración se toma en base a que la diferencia de la salida de los hornos y la entrada es muy baja y, por tanto, si se dan temperaturas inferiores a la salida del horno se deberían utilizar quemadores. A su vez, durante los ensayos ha habido temperaturas que diferían considerablemente respecto a la temperatura media y se ha optado por elegir una superior.

Por otro lado, la corriente de aire a introducir para diluir se ha considerado que sea una de dentro de la misma planta, con el fin de ahorrar gastos energéticos al no utilizar totalmente aire proveniente del exterior. Al estar a la temperatura ambiente del interior de la instalación se ha supuesto una temperatura de 30 °C (303 K) considerando la acumulación de calor en la partes altas de la planta, en donde se sitúa el horno.

Respecto a la temperatura de entrada al filtro de mangas, después de determinar las distintas temperaturas del *acid dew point*, no se prevén posibles deterioros a causa de la corrosión y se ha fijado que la temperatura de entrada al filtro sea cercana a los 160 °C (433 K).

Se puede calcular el calor específico de los humos por medio de la *Ecuación A4.9*, seguidamente se muestra el cálculo realizado.

$$C_{p_h} = 1074 + 0,166 \cdot (433) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (433)^2$$

$$C_{p_h} = 1116,85 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

El peso molecular de los humos húmedos se puede determinar con *Ecuación A4.11*, donde las fracciones se han considerado como un 4 % de CO₂, 16,5 % de O₂, 76 % de N₂ y una humedad del 3,5 %.

$$PM_h = 0,040 \cdot 44 + 0,165 \cdot 32 + 0,760 \cdot 28 + 0,035 \cdot 18 = 28,95 \text{ kg}/\text{kmol}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Aplicando la *Ecuación A4.10* es posible determinar la densidad de los humos, suponiendo una presión de unidad atmosférica y la temperatura supuesta anteriormente.

$$\rho_h = \frac{1 \cdot 28,95}{0,082 \cdot 443} = 0,797 \text{ kg/m}^3$$

Los valores del calor específico y densidad para la corriente de aire se toman a partir de la *Tabla A4.1* para una temperatura de 30 °C.

El caudal volumétrico de la corriente saliente del primer horno es 5152 m³/h, cambiando la unidad de tiempo a la de interés se tienen 1,4311 m³/s.

Una vez se tengan todos los valores necesarios, es posible determinar el caudal volumétrico de aire necesario para llevar a cabo la dilución mediante la *Ecuación A4.7*.

$$Q_{va} = \frac{1,4311 \cdot 0,797 \cdot 1116,85 \cdot 433 - 1,4311 \cdot 0,797 \cdot 1116,85 \cdot 443}{1,164 \cdot 1007 \cdot 303 - 1,164 \cdot 1007 \cdot 433}$$

$$Q_{va} = 0,0836 \text{ m}^3/\text{s}$$

La densidad resultante al juntarse la corriente de humos y la de aire se puede determinar con la *Ecuación A4.8* tal y como se muestra a continuación.

$$\rho_f = \frac{1,4311 \cdot 0,797 + 0,0836 \cdot 1,164}{(1,4311 + 0,0836)} = 0,817 \text{ kg/m}^3$$

Al haber calculado los caudales volumétricos y las densidades reales, es posible estimar el diámetro de la conducción empleando la *Ecuación A4.3* (utilizando la suma de los dos caudales volumétricos) y la *Tabla A4.2* para ver cuál diámetro se ajusta mejor para esta conducción. Se obtiene la *Tabla A4.3* para seleccionar el diámetro óptimo a partir de la velocidad.

Tabla A4.3 Selección del diámetro de la conducción del tramo 1

D_e (m)	D_i (m)	v (m/s)
0,251	0,238	34,1620
0,316	0,299	21,5146
0,356	0,337	16,9413

Dentro de los resultados obtenidos, las tres velocidades vistas en la tabla anterior son las que más proximidad tienen al intervalo de interés.

Se ha optado por la velocidad intermedia, puesto que, es la que satisface plenamente el intervalo establecido. Se tendría un diámetro de 0,299 m para este primer tramo. A su vez, el tramo que conecta la corriente de disolución con el tramo 1 y la posible salida de emergencia, tendrían el mismo diámetro.

4.2. DIÁMETRO DEL TRAMO 2

En este segundo tramo, se ha considerado por las mismas razones que en el tramo anterior una temperatura de 170 °C y 30 °C para la corriente de dilución y 160 °C como temperatura a introducir al filtro.

Se tiene de esta forma que el calor específico y la densidad de la corriente de humos serán las mismas que en el tramo 1. Paralelamente, se ha utilizado la *Tabla A4.1* para obtener los valores del calor específico y densidad de la corriente de aire.

El caudal volumétrico a la salida del segundo horno es de 5300 m³/h, pasado a las unidades de interés, resulta ser de 1,4722 m³/s.

Con los parámetros necesarios ya definidos, se utiliza la *Ecuación A4.7* para determinar el caudal de aire seco necesario para la dilución.

$$Q_{v_a} = \frac{1,4722 \cdot 0,797 \cdot 1116,85 \cdot 433 - 1,4722 \cdot 0,797 \cdot 1116,85 \cdot 443}{1,164 \cdot 1007 \cdot 303 - 1,164 \cdot 1007 \cdot 433}$$

$$Q_{v_a} = 0,0860 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con la ayuda de la *Ecuación A4.8* es posible determinar la densidad resultante de la unión de ambas corrientes.

$$\rho_f = \frac{1,4722 \cdot 0,797 + 0,0860 \cdot 1,164}{(1,4722 + 0,0860)} = 0,817 \text{ kg/m}^3$$

Con el caudal volumétrico resultante es posible estimar las distintas velocidades en función de los diámetros internos propuestos en la *Tabla A4.1*. Los resultados se plasman en la *Tabla A4.4*.

Tabla A4.4 Selección del diámetro de la conducción del tramo 2

D _e (m)	D _i (m)	v (m/s)
0,251	0,238	35,1431
0,316	0,299	22,1325
0,356	0,337	17,4278

Para este caso también se seleccionaría un diámetro interno de 0,299 m al igual que en el tramo anterior, al coincidir la mayoría de los parámetros característicos de estas dos corrientes. Análogamente el tramo de disolución tendría el mismo diámetro al ser una adhesión a este y también el tramo de salida de emergencia.

4.3. DIÁMETRO DEL TRAMO 3 Y 4

Dentro de este tercer y cuarto tramo, se tendría un caudal volumétrico resultante que sería la suma de ambos caudales anteriores, teniendo así un caudal volumétrico de 3,0729 m³/s.

La densidad resultante se podría estimar aplicando la *Ecuación A4.8* a este caso concreto, como se muestra a continuación.

$$\rho_f = \frac{1,5147 \cdot 0,817 + 1,5582 \cdot 0,817}{(1,5147 + 1,5582)} = 0,817 \text{ kg/m}^3$$

Utilizando el mismo procedimiento anterior, con el caudal resultante se estiman las velocidades de los distintos diámetros internos supuestos. Ver *Tabla A4.5*.

Tabla A4.5 Selección del diámetro de la conducción del tramo 3 y 4

D _e (m)	D _i (m)	v (m/s)
0,401	0,380	27,0666
0,451	0,428	21,3885
0,502	0,475	17,3263

En base a los resultados obtenidos, se seleccionaría un diámetro interno de 0,428 m para el tramo 3 y para el tramo 4.

El tramo de la salida de emergencia tendría el mismo diámetro que el que se acaba de estimar para el tramo 3.

4.4. DIÁMETRO DEL TRAMO 5

Para el último tramo considerado, la temperatura de entrada a este tramo será una de 427,9 K (valor obtenido en el posterior apartado de *Pérdidas de calor*), y que la temperatura para la emisión al exterior ha sido supuesta como una de 418 K para que no se llegue a afectar al medio receptor y esta no debería ser inferior a 413 K para evitar que posibles condensaciones de las partículas restantes.

Considerando la *Ecuación A4.9*, es posible calcular el calor específico de la corriente de gases como se muestra a continuación.

$$C_{p_h} = 1074 + 0,166 \cdot (427,9) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (427,9)^2$$

$$C_{p_h} = 1116,69 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

La densidad de la corriente gaseosa se puede estimar mediante la *Ecuación A4.10*, donde el peso molecular será el mismo calculado en apartados posteriores.

$$\rho_h = \frac{1 \cdot 28,95}{0,082 \cdot 427,9} = 0,825 \text{ kg/m}^3$$

Paralelamente, la densidad y el calor específico de la corriente de aire seco para diluir se toman de la *Tabla A4.1*, a la temperatura de 15 °C.

Para la obtención del caudal de dilución, mediante la *Ecuación A4.7* es posible obtener el caudal volumétrico necesario para que se lleve a cabo la dilución.

$$Q_{va} = \frac{3,0729 \cdot 0,825 \cdot 1116,69 \cdot 418 - 3,0729 \cdot 0,825 \cdot 1116,69 \cdot 427,9}{1,225 \cdot 1007 \cdot 288 - 1,225 \cdot 1007 \cdot 418}$$

$$Q_{va} = 0,1748 \text{ m}^3/\text{s}$$

La densidad final, puede sufrir pequeñas variaciones tras mezclarse ambas corrientes. Esta se puede calcular con la *Ecuación A4.8*.

$$\rho_f = \frac{3,0729 \cdot 0,825 + 0,1748 \cdot 1,225}{(3,0729 + 0,1748)} = 0,847 \text{ kg/m}^3$$

Aplicando el mismo procedimiento que en apartados anteriores, se estima diferentes diámetros con el caudal volumétrico y se obtiene la velocidad haciendo uso de la *Ecuación A4.3*. Con ello se obtiene la *Tabla A4.6*.

Tabla A4.6 Selección del diámetro de la conducción del tramo 5

D _e (m)	D _i (m)	v (m/s)
0,451	0,428	22,6052
0,502	0,475	18,3119
0,632	0,599	11,5325

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Con estos resultados se seleccionaría un diámetro interno de 0,475 m para el tramo 5 del sistema de depuración. El tramo de dilución tendría este mismo diámetro.

Se recopila mediante la *Tabla A4.7* los diferentes diámetros internos y externos seleccionados para los diferentes tramos junto a sus velocidades. Dichos valores serán utilizados más adelante para los cálculos de los demás apartados.

Tabla A4.7 Resumen de los diámetros seleccionados para cada uno de los tramos

Tramo	D _e (m)	D _i (m)	v (m/s)
1	0,316	0,299	21,5146
2	0,316	0,299	22,1325
3	0,451	0,428	21,3885
4	0,451	0,428	21,3885
5	0,502	0,475	18,3119

5. PÉRDIDAS DE CALOR

A continuación, se detallan los cálculos realizados para la obtención de las temperaturas en los distintos tramos planteados para el sistema de depuración, teniendo en cuenta las pérdidas de calor.

Para las posibles pérdidas de calor sufridas a lo largo del sistema de depuración, se ha optado por calorifugar mediante una capa de lana de vidrio, el cual es un aislante térmico muy empleado a nivel industrial, con una fina capa de aluminio para tener así unas conducciones que pierdan la menor temperatura posible y evitar así, la posible instalación de un quemador para aportar calor en caso de que las temperaturas salientes del horno sean inferiores a las previstas.

Se muestra mediante la *Figura A5.1*, la analogía eléctrica de las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

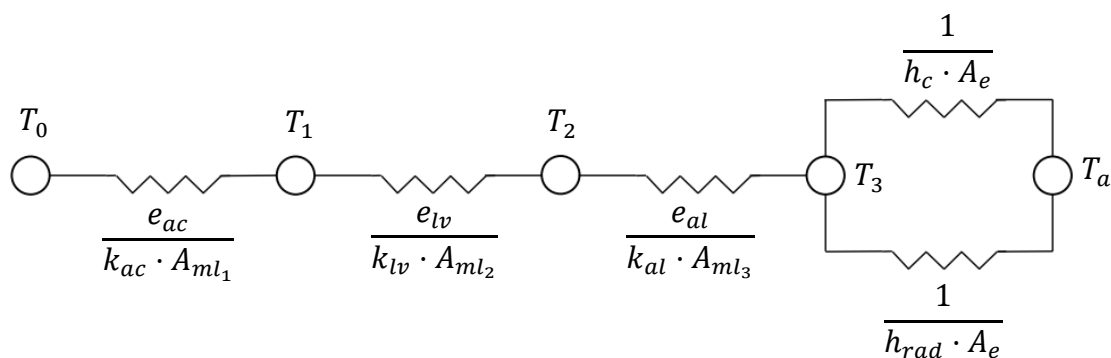


Figura A5.1 Analogía eléctrica de las conducciones

Se ha considerado, tres capas de material siendo estas las del acero al carbono (a_c), la lana de vidrio (l_v) y el aluminio (a_l).

Por otro lado, se ha considerado que el coeficiente individual de transmisión de calor por convección (h_c) hace referencia al externo, puesto que, se ha tomado que la temperatura de la pared es la misma que la de dentro de la conducción.

Para la radiación, se ha tomado como un cuerpo gris debido a que los materiales empleados no alcanzan a absolver toda la radiación electromagnética recibida para considerarlo como un cuerpo negro.

Por medio de la *Figura A5.2*, se puede un esquema del perfil de temperaturas propuesto. Donde se prevé la evolución de las distintas temperaturas a través de las distintas capas de material, desde la temperatura interior de la conducción (T_0) y la temperatura de los alrededores (T_a).

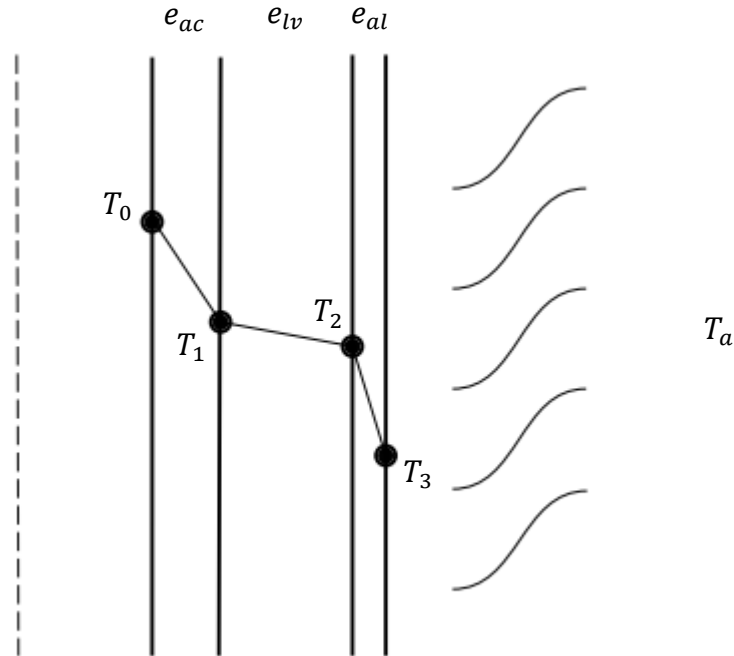


Figura A5.2 Esquema del perfil de temperaturas

A partir de la analogía eléctrica mostrada anteriormente, es posible obtener el flujo de calor mediante la *Ecuación A5.1*.

$$q = \frac{T_0 - T_1}{\frac{e_{ac}}{k_{ac} \cdot A_{ml_1}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_{lv}}{k_{lv} \cdot A_{ml_2}}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_{al}}{k_{al} \cdot A_{ml_3}}} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad}) \cdot A_e}} \quad (A5.1)$$

Donde:

$T_0 \equiv$ Temperatura en el interior a la entrada del tramo (K)

$T_1 \equiv$ Temperatura posterior a la capa de acero al carbono (K)

$T_2 \equiv$ Temperatura posterior a la capa de lana de vidrio (K)

$T_3 \equiv$ Temperatura posterior a la capa de aluminio (K)

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

$T_a \equiv$ Temperatura de los alrededores (K)

$e_{ac} \equiv$ Espesor de la capa de acero al carbono (m)

$e_{lv} \equiv$ Espesor de la capa de lana de vidrio (m)

$e_{al} \equiv$ Espesor de la capa de aluminio (m)

$k_{ac} \equiv$ Conductividad térmica del acero al carbono (W/(m · K))

$k_{lv} \equiv$ Conductividad térmica de la lana de vidrio (W/(m · K))

$k_{al} \equiv$ Conductividad térmica del aluminio (W/(m · K))

$A_{ml_1} \equiv$ Área media logarítmica del acero al carbono (m²)

$A_{ml_2} \equiv$ Área media logarítmica de la lana de vidrio (m²)

$A_{ml_3} \equiv$ Área media logarítmica del aluminio (m²)

$h_c \equiv$ Coeficiente individual de transmisión por convección (W/(m² · K))

$h_{rad} \equiv$ Coeficiente individual de transmisión por radiación (W/(m² · K))

$A_e \equiv$ Área externa (m²)

Las diferentes conductividades térmicas de los materiales utilizados son recopiladas en la *Tabla A5.1* vista a continuación.

Tabla A5.1 Conductividades térmicas utilizadas [12]

Material	k (W/(m·K))
Acero al carbono	45
Lana de vidrio	0,047
Aluminio	237

En cuanto a los distintos espesores, estos vienen relacionados por los distintos radios existentes entre las distintas capas de los materiales. Mediante la *Figura A5.3*, es posible observar en mayor detalle el tipo de conducción circular utilizada para el sistema de depuración.

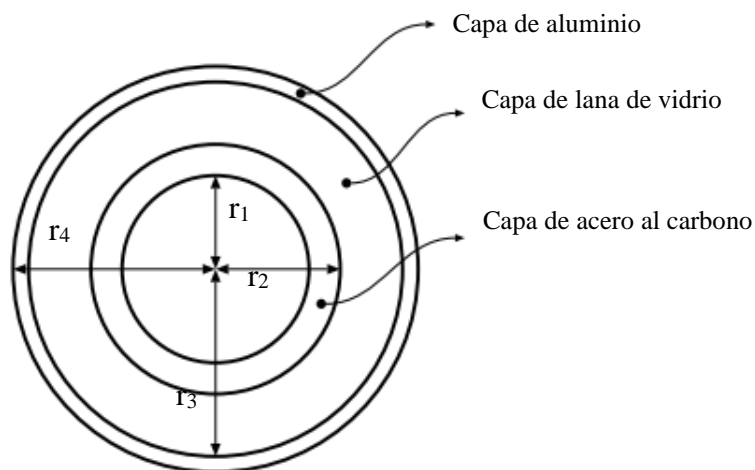


Figura A5.3 Esquema de la conducción circular

Los radios 1 y 2, son obtenidos a partir de los diámetros calculados en el apartado anterior, mientras que para el radio 3 es la suma del radio 2 más un espesor supuesto de 3 cm para la capa de lana de vidrio, el cual suele ser un espesor de referencia utilizado habitualmente en la industria. El radio 4 es la suma del radio 3 y un espesor supuesto de 0,5 cm, el cual a su vez es una aproximación al tamaño utilizado a nivel industrial. [9]

Los distintos espesores para los cálculos se pueden determinar como el diferencial del radio exterior de la capa, respecto al radio interior.

Para el área externa y el área media logarítmica, se considera el área de una conducción circular. Ver *Ecuación A5.2* y *Ecuación A5.3*.

$$A_e = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l \quad (A5.2)$$

$$A_{ml_i} = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_{ext} - r_{int}}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)} \quad (A5.3)$$

Donde:

$r_4 \equiv$ Radio externo de la conducción (m)

$l \equiv$ Longitud del tramo (m)

$r_{ext} \equiv$ Radio externo de la capa (m)

$r_{int} \equiv$ Radio interno de la capa (m)

En cuanto al coeficiente individual de transmisión de calor por convección natural se ha considerado un valor de $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, al ser este un valor comprobado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) para el trato con velocidades a temperatura ambiente. [13]

El coeficiente individual de transmisión de calor por radiación se puede determinar con la *Ecuación A5.4*. Dentro de esta se ha considerado que las conducciones emisoras están completamente rodeadas por la superficie con la que se intercambia calor, siendo a su vez esta superficie más grande que el área de las conducciones. Se ha considerado la emisividad de un cuerpo gris al considerar gases contaminantes por dentro de las conducciones de acero al carbono.

$$h_{rad} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)} \quad (A5.4)$$

Donde:

σ : Constante de Stefan Boltzman ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

ε_{al} : Emisividad del aluminio

Para el caso que se está estudiando, la temperatura de la última capa (T_3) no es conocida y se precisa de una iteración para obtener dicho valor y poder calcular el flujo de calor.

Al conocer el flujo de calor, es posible calcular la temperatura a la salida de cada tramo por medio de la *Ecuación A5.5*.

$$q = Q_{vN} \cdot \rho_N \cdot C_p \cdot (T_0 - T_S)$$
$$T_S = T_0 - \frac{q}{Q_{vN} \cdot \rho_N \cdot C_p} \quad (A5.5)$$

Donde:

$T_S \equiv$ Temperatura a la salida del tramo (K)

$Q_{vN} \equiv$ Caudal volumétrico del gas en condiciones normales (Nm^3/s)

$\rho_N \equiv$ Densidad del gas en condiciones normales (kg/Nm^3)

$C_p \equiv$ Calor específico del gas ($J/(kg \cdot K)$)

Para poder determinar la temperatura de salida, es necesario tener los valores del caudal volumétrico y la densidad en condiciones normales, se puede obtener una aproximación de estos valores por medio de la *Ecuación A5.6* y *Ecuación A5.7*.

$$Q_{vN} = Q_{vR} \cdot \frac{T_N}{T_R} \quad (A5.6)$$

$$\rho_N = \rho_R \cdot \frac{T_R}{T_N} \quad (A5.7)$$

Donde:

$Q_{vR} \equiv$ Caudal volumétrico del gas en condiciones reales (m^3/s)

$\rho_R \equiv$ Densidad del gas en condiciones reales (kg/m^3)

$T_R \equiv$ Temperatura en condiciones reales (K)

$T_N \equiv$ Temperatura en condiciones normales (K)

Paralelamente, es posible determinar el calor específico del gas mediante la *Ecuación A5.8*, la cual ha sido empleada ya en apartados anteriores.

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot T_{hm} - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot T_{hm}^2 \quad (A5.8)$$

Donde:

$$T_{hm} \equiv \text{Temperatura media de los humos (K)}$$

Respecto al intercambio de calor en el interior del filtro de mangas, este tendrá una geometría diferente a la de las conducciones, siendo una parecida a la de paredes planas compuestas. Esto se puede apreciar mejor mediante la *Figura A5.4*.

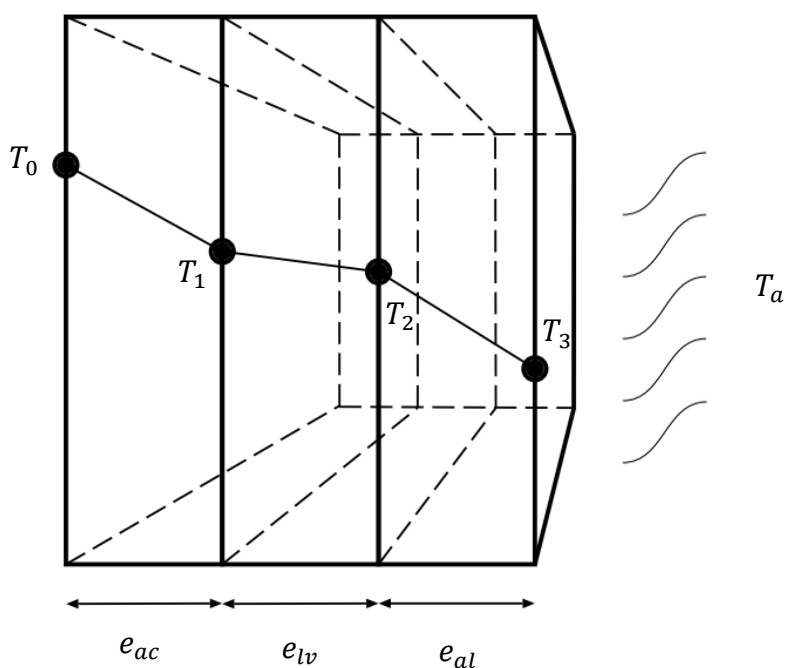


Figura A5.4 Esquema de las paredes planas en el interior del filtro de mangas

A su vez, la analogía eléctrica cambia ligeramente. Se puede ver la analogía utilizada para el interior del filtro de mangas en la *Figura A5.5* vista a continuación.

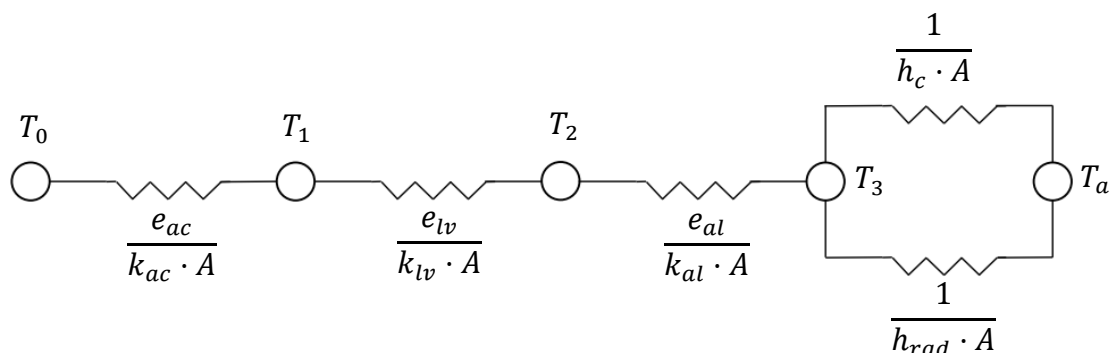


Figura A5.5 Analogía eléctrica en el interior del filtro de mangas

La obtención de la temperatura de la última capa (T_3) también necesitaría de una iteración para su obtención. Se puede reescribir la *Ecuación A5.1* en forma de *Ecuación A5.9*, considerando que el área no será el de un recubrimiento cilíndrico en serie, sino que será una pared plana con área constante.

$$\frac{q}{A} = \frac{T_0 - T_1}{\frac{e_{ac}}{k_{ac}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_{lv}}{k_{lv}}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_{al}}{k_{al}}} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad})}} \quad (A5.9)$$

Pese a esto, al estar dentro de este tipo de conducciones donde el flujo de calor se calcula mediante la *Ecuación A5.10*.

$$\frac{q}{A} = b \cdot (T_3 - T_a)^{1,25} + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot [(T_3)^4 - (T_a)^4] \quad (A5.10)$$

Donde:

$A \equiv$ Área total del filtro de mangas (m^2)

$b \equiv$ Coeficiente de proporcionalidad

La presunta ecuación es extraída del PERRY, donde el coeficiente de proporcionalidad (b) tiene distintos valores dependiendo de si pretende obtener el flujo de calor de las paredes verticales u horizontales. [14]

Para el área del filtro de mangas, se ha considerado que este sea aproximadamente la unión de un rectángulo y un trapecio. Se puede ver en mayor detalle esta geometría mediante la *Figura A5.6*.

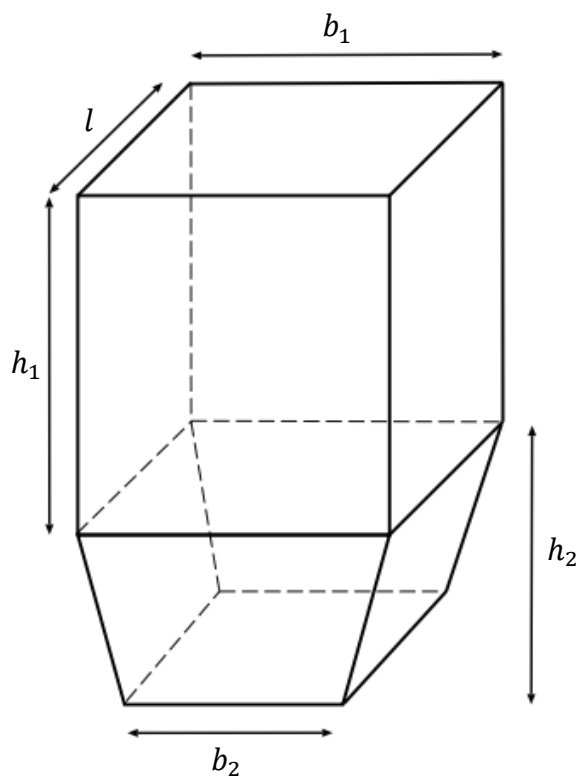


Figura A5.6 Aproximación de la geometría del filtro de mangas

Se recopilan en la *Tabla A5.2* las diferentes medidas de la figura anterior. Estos valores son una aproximación para el dimensionamiento del filtro de mangas, provenientes de diferentes catálogos industriales. [15]

Tabla A5.2 Valores de las medidas del filtro de mangas

	b_1 (m)	b_2 (m)	l (m)	h_1 (m)	h_2 (m)
Valor	3	0,5	3	4	2

La magnitud de los valores no es una muy elevada al ser este un sistema para caudales pequeños en comparación a grandes producciones industriales.

5.1. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 1

Para este primer tramo del sistema de depuración, se tomara de referencia una temperatura de entrada (T_0) de 433 K, siendo esta la temperatura posterior al primer ventilador y una temperatura de los alrededores (T_a) de 303 K, correspondiente a la temperatura supuesta del interior de la planta.

En la *Tabla A5.3* se recopilan los datos de los distintos radios y la longitud utilizada para los cálculos.

Tabla A5.3 Radios y longitud para los cálculos del tramo 1

	r_1 (m)	r_2 (m)	r_3 (m)	r_4 (m)	l (m)
Valor	0,1495	0,1580	0,1880	0,1930	12

Los valores de las distintas resistencias se pueden calcular a partir de los datos de la *Tabla A5.1*, correspondiente a las conductividades térmicas de los diferentes materiales, y la *Tabla A5.3*.

En la mayoría de los cálculos de las resistencias, las conductividades del acero al carbono y aluminio son prácticamente despreciables frente a la de la lana de vidrio. Pese a ello, se ha visto oportuno realizar el cálculo igualmente.

$$R_1 = \frac{r_2 - r_1}{k_{ac} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_2 - r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} = \frac{0,1580 - 0,1495}{45 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot \frac{0,1580 - 0,1495}{\ln\left(\frac{0,1580}{0,1495}\right)}}$$

$$R_1 = 1,6298 \cdot 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{r_3 - r_2}{k_{lv} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_3 - r_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} = \frac{0,1880 - 0,1580}{0,047 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot \frac{0,1880 - 0,1580}{\ln\left(\frac{0,1880}{0,1580}\right)}}$$

$$R_2 = 0,0491 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{r_4 - r_3}{k_{al} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_4 - r_3}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}} = \frac{0,1930 - 0,1880}{237 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot \frac{0,1930 - 0,1880}{\ln\left(\frac{0,1930}{0,1880}\right)}}$$

$$R_3 = 1,4689 \cdot 10^{-6} \text{ K/W}$$

A partir de la *Ecuación A5.1* e introduciendo en esta la *Ecuación A5.2* y *Ecuación A5.4*; se obtiene una expresión que permite realizar la iteración para la obtención de la T_3 .

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{\left[h_c + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)} \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l}}$$

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l \cdot [h_c \cdot (T_3 - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)]$$

Se sustituyen los valores conocidos para esta expresión, donde la constante de Stefan Boltzmann es $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ y la emisividad del aluminio es de 0,05. [6] [16]

$$\frac{433 - T_3}{0,0491} = 2 \cdot \pi \cdot 0,1930 \cdot 12 \cdot [5 \cdot (T_3 - 303) + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (T_3^4 - 303^4)]$$

$$433 - T_3 = 3,5708 \cdot T_3 - 1081,95 + 2,0268 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4 - 17,0655$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{1532,0155 - 4,5708 \cdot T_3}{2,0268 \cdot 10^{-9}}}$$

Se puede determinar así el valor de T_3 suponiendo valores hasta que el valor supuesto sea muy parecido al calculado. Los resultados de la iteración se muestran en la *Tabla A5.4*.

Tabla A5.4 Iteración para la obtención de T₃ en el tramo 1

T ₃ supuesta (K)	T ₃ calculada (K)
300,0	530,7
330,0	328,7
335,0	140,8
329,9	330,2

Se obtiene así que la T₃ sería aproximadamente 329,9 K. Con esta temperatura es posible obtener el coeficiente individual de transmisión de calor por radiación utilizando la *Ecuación A5.4*.

$$h_{rad} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (329,9^4 - 303^4)}{(329,9 - 303)} = 0,3600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Mediante la relación de las diferentes resistencias de la *Ecuación A5.1* es posible determinar el flujo de calor.

$$q = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad}) \cdot A_e}} = \frac{329,9 - 303}{\frac{1}{(5 + 0,36) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,1930 \cdot 12}} = 2098,15 \text{ W}$$

Utilizando la *Ecuación A5.6*, *Ecuación A5.7* y *Ecuación A5.8* es posible obtener los valores del caudal volumétrico, la densidad y el calor específico necesario para determinar la temperatura de salida del tramo.

$$Q_{vN} = 1,5147 \cdot \frac{273}{433} = 0,9550 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\rho_N = 0,817 \cdot \frac{433}{273} = 1,296 \text{ kg}/\text{Nm}_3$$

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot (433) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (433)^2 = 1116,85 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Al disponer de los datos necesarios, es posible aplicar la *Ecuación A5.5* para obtener la temperatura de salida del tramo 1 (T_s).

$$T_s = 433 - \frac{2098,15}{0,9550 \cdot 1,296 \cdot 1116,85} = 431,5 \text{ K}$$

5.2. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 2

El segundo tramo del sistema de depuración parte de una misma serie de valores que los utilizados en el primer tramo, por tanto, se puede suponer que la primera parte de los cálculos sería idéntica que la del tramo 1.

Se tendría así un flujo de calor de 2098,15 W. Se tendría que determinar el caudal volumétrico con la *Ecuación A5.6* para el cálculo de la temperatura de salida, al ser los valores de la densidad y el calor específico los mismos que en el apartado anterior.

$$Q_{v_N} = 1,5582 \cdot \frac{273}{433} = 0,9824 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

Aplicando la *Ecuación A5.5*, se determina la temperatura de salida para este segundo tramo del sistema de depuración.

$$T_s = 433 - \frac{2098,15}{0,9824 \cdot 1,264 \cdot 1116,85} = 431,5 \text{ K}$$

5.3. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 3

En el tramo 3 se produce la unión de las corriente de los tramos 1 y 2. De esta forma, se tendría que realizar un balance de energía para obtener así la temperatura resultante. Mediante la *Figura A5.7* se puede ver un esquema de dicha situación.

Para el caso considerado, la mayoría de los parámetros tienen valores muy similares los unos entre otros, por tanto, la temperatura resultante sería una similar a la media de las dos temperaturas.

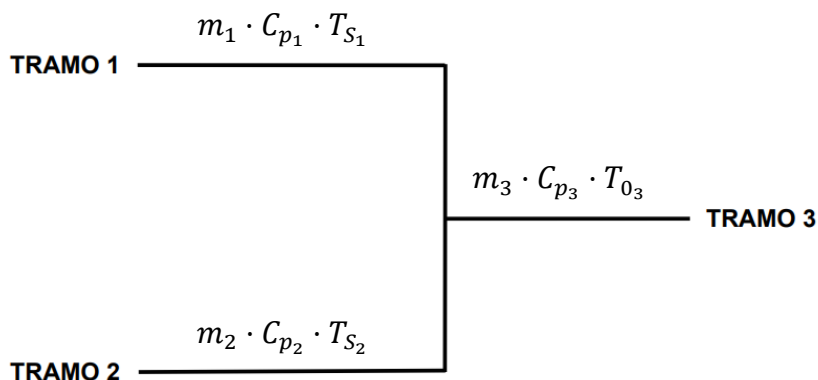


Figura A5.7 Esquema del balance de energía a realizar

$$m_1 \cdot C_{p_1} \cdot T_{S_1} + m_2 \cdot C_{p_2} \cdot T_{S_2} = m_3 \cdot C_{p_3} \cdot T_{0_3}$$

$$m_1 \cdot C_{p_1} \cdot T_{S_1} + m_2 \cdot C_{p_2} \cdot T_{S_2} = (m_1 \cdot C_{p_1} + m_2 \cdot C_{p_2}) \cdot T_{0_3}$$

$$T_{0_3} = \frac{m_1 \cdot C_{p_1} \cdot T_{S_1} + m_2 \cdot C_{p_2} \cdot T_{S_2}}{m_1 \cdot C_{p_1} + m_2 \cdot C_{p_2}}$$

$$T_{0_3} = \frac{Q_{v_1} \cdot \rho_1 \cdot C_{p_1} \cdot T_{S_1} + Q_{v_2} \cdot \rho_2 \cdot C_{p_2} \cdot T_{S_2}}{Q_{v_1} \cdot \rho_1 \cdot C_{p_1} + Q_{v_2} \cdot \rho_2 \cdot C_{p_2}}$$

$$T_{0_3} = \frac{0,9550 \cdot 1,296 \cdot 1116,85 \cdot 431,5 + 0,9824 \cdot 1,296 \cdot 1116,85 \cdot 431,5}{0,9550 \cdot 1,296 \cdot 1116,85 + 0,9824 \cdot 1,296 \cdot 1116,85}$$

$$T_{0_3} = 431,5 \text{ K}$$

Se recopilan a continuación en la *Tabla A5.5* los valores de los radios y la longitud para los cálculos de este tercer tramo.

Tabla A5.5 Radios y longitud para los cálculos del tramo 3

	r ₁ (m)	r ₂ (m)	r ₃ (m)	r ₄ (m)	l (m)
Valor	0,2140	0,2255	0,2555	0,2605	3,5

Análogamente a los cálculos del primer tramo, las distintas resistencias se pueden calcular a partir de los datos de la *Tabla A5.1*, y *Tabla A5.5*.

$$R_1 = \frac{r_2 - r_1}{k_{ac} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_2 - r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} = \frac{0,2255 - 0,2140}{45 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot \frac{0,2255 - 0,2140}{\ln\left(\frac{0,2255}{0,2140}\right)}}$$

$$R_1 = 5,2894 \cdot 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{r_3 - r_2}{k_{lv} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_3 - r_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} = \frac{0,2555 - 0,2255}{0,047 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot \frac{0,2555 - 0,2255}{\ln\left(\frac{0,2555}{0,2255}\right)}}$$

$$R_2 = 0,1208 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{r_4 - r_3}{k_{al} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_4 - r_3}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}} = \frac{0,2605 - 0,2555}{237 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot \frac{0,2605 - 0,2555}{\ln\left(\frac{0,2605}{0,2555}\right)}}$$

$$R_3 = 3,7185 \cdot 10^{-6} \text{ K/W}$$

Partiendo de la *Ecuación A5.1* y combinando esta misma con la *Ecuación A5.2* y *Ecuación A5.4*; es posible realizar la iteración para la obtención de la T_3 .

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{\left[h_c + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)} \right]} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l}}$$

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l \cdot [h_c \cdot (T_3 - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)]$$

$$431,5 - T_3 = 3,4630 \cdot T_3 - 1049,2877 + 1,9635 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4 - 16,5503$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{1497,3380 - 4,4630 \cdot T_3}{1,9635 \cdot 10^{-9}}}$$

Realizando el mismo procedimiento explicado con anterioridad, se obtiene la *Tabla A5.6*.

Tabla A5.6 Iteración para la obtención de T₃ en el tramo 3

T ₃ supuesta (K)	T ₃ calculada (K)
300,0	533,0
330,0	334,4
330,3	329,7

Se obtiene así que la T₃ sería aproximadamente 330,3 K. Con esta temperatura es posible obtener el coeficiente individual de transmisión de calor por radiación utilizando la *Ecuación A5.4*.

$$h_{rad} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (330,3^4 - 303^4)}{(330,3 - 303)} = 0,3607 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Mediante la relación de las diferentes resistencias de la *Ecuación A5.1* es posible determinar el flujo de calor.

$$q = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad}) \cdot A_e}} = \frac{330,3 - 303}{\frac{1}{(5 + 0,3607) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,2605 \cdot 3,5}} = 838,40 \text{ W}$$

Para la obtención de la temperatura de salida, se debe tener en cuenta que el caudal volumétrico resultante será la suma de los caudales volumétricos de los tramos 1 y 2. Por otro lado, la densidad se puede estimar también por medio de una balance de energía.

$$Q_v = Q_{v_1} + Q_{v_2} = 1,5147 + 1,5582 = 3,0729 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_f = \frac{1,5147 \cdot 0,817 + 1,5582 \cdot 0,817}{(1,5147 + 1,5582)} = 0,817 \text{ kg/m}^3$$

Aplicando la *Ecuación A5.6*, *Ecuación A5.7* y *Ecuación A5.8* es posible obtener los valores necesarios para determinar la temperatura de salida del tramo.

$$Q_{v_N} = 3,0729 \cdot \frac{273}{431,5} = 1,9442 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\rho_N = 0,817 \cdot \frac{431,5}{273} = 1,291 \text{ kg/Nm}_3$$

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot (431,5) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (431,5)^2 = 1116,80 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

Con todos los datos necesarios, es posible aplicar la *Ecuación 5.5* para obtener la temperatura de salida del tramo 3 (T_s).

$$T_s = 431,5 - \frac{838,40}{1,9442 \cdot 1,291 \cdot 1116,80} = 431,2 \text{ K}$$

5.4. TEMPERATURA A LA SALIDA DEL FILTRO

Para el interior del filtro se considerado una temperatura de alrededores de 15 °C, al operar el filtro con aire proveniente del exterior. Siendo esta una estimación de la temperatura media a lo largo del año en esa región.

En la *Tabla A5.7* se recopilan los diferentes espesores de las capas del filtro de mangas propuesto. Los espesores fueron seleccionados a partir de las dimensiones estándar de las chapas de acero al carbono (1 mm) y un recubrimiento que permita obtener una temperatura de pared (T_3) comprendida entre 40-50 °C, buscando no emplear mucho grosor de aislante, puesto que, esta acción supondría unos costes elevados. [15]

Tabla A5.7 Espesores de las capas para los cálculos del filtro de mangas

	e_{ac} (m)	e_{lv} (m)	e_{al} (m)
Valor	0,001	0,035	0,005

Las distintas resistencias se pueden calcular a partir de los datos de la *Tabla A5.1*, y la *Tabla A5.7*.

$$R_1 = \frac{e_{ac}}{k_{ac}} = \frac{0,001}{45} = 2,2222 \cdot 10^{-4} (m^2 \cdot K)/W$$

$$R_2 = \frac{e_{lv}}{k_{lv}} = \frac{0,035}{0,047} = 0,7447 (m^2 \cdot K)/W$$

$$R_3 = \frac{e_{al}}{k_{al}} = \frac{0,005}{237} = 2,1097 \cdot 10^{-5} (m^2 \cdot K)/W$$

Con la combinatoria de la *Ecuación A5.9* y *Ecuación A5.4* se obtiene una expresión para poder realizar la iteración y determinar así T_3 .

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{h_c + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)}}$$

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = h_c \cdot (T_3 - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)$$

$$\frac{431,20 - T_3}{0,7447} = 5 \cdot (T_3 - 288) + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (T_3^4 - 288^4)$$

$$431,2 - T_3 = 3,7235 \cdot T_3 - 1072,3680 + 2,1112 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4 - 14,5246$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{1518,0926 - 4,7235 \cdot T_3}{2,1112 \cdot 10^{-9}}}$$

Análogamente a los apartados anteriores, se suponen valores de T_3 , hasta que el valor supuesto sea muy parecido al calculado. Los resultados se pueden ver en la *Tabla A5.8*.

Tabla A5.8 Iteración para la obtención de T_3 en el interior del filtro de mangas

T_3 supuesta (K)	T_3 calculada (K)
300,0	467,7
310,0	399,6
315,0	345,8
316,9	316,6

El resultado de la iteración da lugar a una T_3 de 316,9 K, con esta temperatura es posible emplear la *Ecuación A5.10*, para paredes verticales y horizontales.

5.4.1. PAREDES VERTICALES

Considerando una misma área de las paredes laterales del filtro de mangas debido a su geometría cuadrangular, se procede a calcular la pérdida de calor en una de ellas y posteriormente se multiplicará por el número de paredes presentes.

Se aplica de esta forma, la *Ecuación A5.10* para paredes verticales. En esta el coeficiente de proporcionalidad (b) será igual a 1,37.

$$\frac{q}{A} = 1,37 \cdot (316,9 - 288)^{1,25} + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot [(316,9)^4 - (288)^4]$$

$$\frac{q}{A} = 100,89 \text{ W/m}^2$$

Calculando el área del filtro de mangas, es posible determinar el flujo de calor para las paredes verticales, tal y como se muestra a continuación.

$$A_R = b_1 \cdot h_1 = 3 \cdot 4 = 12 \text{ m}^2$$

$$A_T = h_2 \cdot \frac{b_1 + b_2}{2} = 2 \cdot \frac{3 + 0,5}{2} = 3,5 \text{ m}^2$$

$$A = A_R + A_T = 12 + 3,5 = 15,5 \text{ m}^2$$

$$q = 100,89 \cdot 15,5 = 1563,76 \text{ W} \cdot 4 \text{ paredes} = 6255,05 \text{ W}$$

5.4.2. PAREDES HORIZONTALES

Aplicando el mismo criterio anterior, pero para las paredes horizontales se tiene que el coeficiente de proporcionalidad (b) de la *Ecuación A5.10* sería de 1,86.

$$\frac{q}{A} = 1,86 \cdot (410,65 - 288)^{1,25} + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot [(410,65)^4 - (288)^4]$$

$$\frac{q}{A} = 133,72 \text{ W/m}^2$$

El área correspondiente sería la del techo del filtro y el flujo de calor para las paredes horizontales sería el siguiente.

$$A = b_1 \cdot l = 3 \cdot 3 = 9 \text{ m}^2$$

$$q = 133,72 \cdot 9 = 1203,50 \text{ W}$$

5.4.3. TEMPERATURA DE SALIDA DEL FILTRO

Es posible obtener el flujo de calor total en el filtro con la suma del flujo de calor de las paredes laterales y horizontales.

$$q_T = 6255,05 + 1203,50 = 7458,54 \text{ W}$$

Haciendo uso de la *Ecuación A5.6*, *Ecuación A5.7* y *Ecuación A5.8* es posible obtener los valores necesarios para determinar la temperatura de salida del tramo.

$$Q_{v_N} = 3,0729 \cdot \frac{273}{431,2} = 1,9455 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\rho_N = 0,817 \cdot \frac{431,2}{273} = 1,290 \text{ kg/Nm}_3$$

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot (431,2) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (431,2)^2 = 1116,79 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

Con todos los datos necesarios, es posible aplicar la *Ecuación A5.5* para obtener la temperatura de salida del tramo 3 (T_s).

$$T_s = 431,2 - \frac{7458,54}{1,9455 \cdot 1,290 \cdot 1116,79} = 428,5 \text{ K}$$

5.5. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 4

Para el cuarto tramo del sistema de depuración, se parte de la temperatura de salida del filtro de mangas y una temperatura de alrededores de 288 K, al estar cerca de las proximidades del filtro de mangas en donde se introduce aire del exterior a esta temperatura para el funcionamiento del equipo.

De la misma forma vista en los apartados anteriores, se elabora la *Tabla 5.9* para recopilar la información de los radios y la longitud utilizada en los cálculos.

Tabla A5.9 Radios y longitud para los cálculos del tramo 4

	r_1 (m)	r_2 (m)	r_3 (m)	r_4 (m)	l (m)
Valor	0,2140	0,2255	0,2555	0,2605	6

Los valores de las distintas resistencias se pueden calcular a partir de los datos de la *Tabla A5.1*, correspondiente a las conductividades térmicas de los diferentes materiales, y *Tabla A5.3*.

$$R_1 = \frac{r_2 - r_1}{k_{ac} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_2 - r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} = \frac{0,2255 - 0,2140}{45 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2255 - 0,2140}{\ln\left(\frac{0,2255}{0,2140}\right)}}$$

$$R_1 = 3,0855 \cdot 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{r_3 - r_2}{k_{lv} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_3 - r_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} = \frac{0,2555 - 0,2255}{0,047 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2555 - 0,2255}{\ln\left(\frac{0,2555}{0,2255}\right)}}$$

$$R_2 = 0,0705 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{r_4 - r_3}{k_{al} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_4 - r_3}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}} = \frac{0,2605 - 0,2555}{237 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2605 - 0,2555}{\ln\left(\frac{0,2605}{0,2555}\right)}}$$

$$R_3 = 2,1691 \cdot 10^{-6} \text{ K/W}$$

Una vez determinadas las resistencias, con la *Ecuación A5.1* e introduciendo en esta misma la *Ecuación A5.2* y *Ecuación A5.4*; es posible el realizar la iteración para la obtención de la T_3 .

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{\left[h_c + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)} \right]} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l}}$$

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l \cdot [h_c \cdot (T_3 - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)]$$

$$428,5 - T_3 = 3,4618 \cdot T_3 - 996,9892 + 1,9628 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4 - 13,5036$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{1438,9928 - 4,4618 \cdot T_3}{1,9628 \cdot 10^{-9}}}$$

El valor de T_3 se puede obtener suponiendo valores hasta que el valor supuesto sea muy parecido al calculado. Los resultados se muestran en la *Tabla A5.10*.

Tabla A5.10 Iteración para la obtención de T_3 en el tramo 4

T_3 supuesta (K)	T_3 calculada (K)
300,0	475,6
310,0	410,7
315,0	361,5
318,0	318,3

La T_3 sería aproximadamente 318 K. Con esta temperatura es posible obtener el coeficiente individual de transmisión de calor por radiación utilizando la *Ecuación A5.4*.

$$h_{rad} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (318^4 - 288^4)}{(318 - 288)} = 0,3162 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$$

Mediante la relación de las diferentes resistencias de la *Ecuación A5.1* es posible determinar el flujo de calor.

$$q = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad}) \cdot A_e}} = \frac{318 - 288}{\frac{1}{(5 + 0,3162) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,2605 \cdot 6}} = 1566,25 \text{ W}$$

Por medio de la *Ecuación A5.6*, *Ecuación A5.7* y *Ecuación A5.8* es posible obtener los valores necesario para determinar la temperatura de salida del tramo.

$$Q_{vN} = 3,0729 \cdot \frac{273}{428,5} = 1,9578 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\rho_N = 0,817 \cdot \frac{428,5}{273} = 1,282 \text{ kg/Nm}_3$$

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot 428,5 - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot 428,5^2 = 1116,71 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

Al disponer de los datos necesarios, es posible aplicar la *Ecuación A5.5* para obtener la temperatura de salida del tramo 4 (T_S).

$$T_S = 428,5 - \frac{1566,25}{1,9578 \cdot 1,282 \cdot 1116,71} = 427,9 \text{ K}$$

5.6. TEMPERATURA DE SALIDA DEL TRAMO 5

Finalmente, la temperatura del tramo 5 será aquella temperatura con la que se emitiría la corriente depurada al medio exterior. Se pueden observar los radios y la longitud de este tramo en la *Tabla A5.10*.

Tabla A5.10 Radios y longitud para los cálculos del tramo 5

	r_1 (m)	r_2 (m)	r_3 (m)	r_4 (m)	l (m)
Valor	0,2375	0,2510	0,2810	0,2860	6

Se pueden calcular los valores de las resistencias, haciendo uso de los datos de la *Tabla A5.1*, y *Tabla A5.10*.

$$R_1 = \frac{r_2 - r_1}{k_{ac} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_2 - r_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}} = \frac{0,2510 - 0,2375}{45 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2510 - 0,2375}{\ln\left(\frac{0,2510}{0,2375}\right)}}$$

$$R_1 = 3,2589 \cdot 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{r_3 - r_2}{k_{lv} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_3 - r_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} = \frac{0,2810 - 0,2510}{0,047 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2810 - 0,2510}{\ln\left(\frac{0,2810}{0,2510}\right)}}$$

$$R_2 = 0,0637 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{r_4 - r_3}{k_{al} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{r_4 - r_3}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}} = \frac{0,2860 - 0,2810}{237 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6 \cdot \frac{0,2860 - 0,2810}{\ln\left(\frac{0,2860}{0,2810}\right)}}$$

$$R_3 = 1,9740 \cdot 10^{-6} \text{ K/W}$$

Con la Ecuación A5.1, Ecuación A5.2 y Ecuación A5.4; se llega a una expresión que permite realizar la iteración para la obtención de la T_3 . Considerando que el cálculo es posterior a la dilución y la temperatura ha sido reducida a 418 K por medio del ventilador.

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{\left[h_c + \frac{\sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)}{(T_3 - T_a)} \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l}}$$

$$\frac{T_0 - T_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot l \cdot [h_c \cdot (T_3 - T_a) + \sigma \cdot \varepsilon_{al} \cdot (T_3^4 - T_a^4)]$$

$$418 - T_3 = 3,4395 \cdot T_3 - 990,5589 + 1,9502 \cdot 10^{-9} \cdot T_3^4 - 13,4165$$

$$T_3 = \sqrt[4]{\frac{1421,9754 - 4,4395 \cdot T_3}{1,9502 \cdot 10^{-9}}}$$

Suponiendo valores de T_3 , hasta que el valor supuesto sea muy parecido al calculado se obtiene la *Tabla A5.11* con el resultado final.

Tabla A5.11 Iteración para la obtención de T₃ en el tramo 5

T ₃ supuesta (K)	T ₃ calculada (K)
300,0	463,7
315,0	331,4
315,9	316,4

Se obtiene así que la T₃ sería aproximadamente 315,9 K. Es posible obtener el coeficiente individual de transmisión de calor por radiación utilizando la *Ecuación A5.4*.

$$h_{rad} = \frac{5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,05 \cdot (315,9^4 - 288^4)}{(315,9 - 288)} = 0,3129 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Mediante la relación de las diferentes resistencias de la *Ecuación A5.1* es posible determinar el flujo de calor.

$$q = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{(h_c + h_{rad}) \cdot A_e}} = \frac{315,9 - 288}{\frac{1}{(5 + 0,3129) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,2860 \cdot 6}} = 1598,21 \text{ W}$$

Haciendo uso de la *Ecuación A5.6*, *Ecuación A5.7* y *Ecuación A5.8* se obtienen los parámetros necesarios para determinar la temperatura de salida del tramo.

$$Q_{vN} = 3,2477 \cdot \frac{273}{418} = 2,1211 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$\rho_N = 0,847 \cdot \frac{418}{273} = 1,297 \text{ kg}/\text{Nm}_3$$

$$C_p = 1074 + 0,166 \cdot (418) - 1,548 \cdot 10^{-4} \cdot (418)^2 = 1116,34 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Al disponer de los datos necesarios, es posible aplicar la *Ecuación A5.5* para obtener la temperatura de salida del tramo último tramo (T_S).

$$T_S = 418 - \frac{1598,21}{2,1211 \cdot 1,297 \cdot 1116,34} = 417,5 K$$

Se obtiene así la última temperatura de salida del sistema de depuración, la corriente tratada abandonaría el sistema a una temperatura aproximada de 144,5 °C. Mediante la cual, no se afectaría el medio receptor y se respetaría la legislación vigente en cuanto a vertido y emisiones a la atmósfera.

Se recopila mediante la *Tabla A5.12* las diferentes temperaturas obtenidas a los largo de los diferentes tramos del sistema de depuración.

Tabla A5.12 Resumen de los resultados obtenidos

Tramo	T_0 (K)	T_3 (K)	T_a (K)	T_S (K)
1	433,0	329,9	303	431,5
2	433,0	329,9	303	431,5
3	431,5	330,3	303	431,2
Filtro de mangas	431,2	316,6	288	428,5
4	428,5	318,0	288	427,9
5	418,0	316,4	288	417,5

6. PÉRDIDAS DE CARGA

Dentro de las conducciones del sistema de depuración, por las cuales van a circular los fluidos se producen pérdidas de carga. Estas son debidas a la fricción entre sí de las mismas partículas del fluido o la que las partículas sufren con las paredes de las conducciones.

Se procede a detallar en el siguiente apartado los cálculos en relación a las pérdidas de carga ocasionadas por los distintos accidentes o tramos rectos, de los distintos tramos del sistema de depuración.

Los distintos cálculos han sido realizados sabiendo que los ventiladores estándares utilizados suelen subsanar unas pérdidas de carga en el interior de las conducciones de 5000 Pa. Por tanto, las pérdidas de carga totales a lo largo de los tramos del sistema de depuración no deberían exceder dicho límite, de lo contrario se necesitaría reducir la longitud considerada de las conducciones, modificar los posibles accidentes y, como última opción a considerar, la implementación de un ventilador que sea capaz de soportar pérdidas de carga mayores.

Para los siguientes cálculos es necesario el conocer el caudal volumétrico que circula por dentro de las conducciones, la velocidad de las corrientes, el diámetro interno de los distintos tramos, las densidades y viscosidades de las distintas corrientes. Estos parámetros se han ido obteniendo a lo largo del proyecto y se recopilan en la *Tabla A6.1*.

Tabla A6.1 Resumen de los parámetros necesarios para los cálculos

	Q_v (m ³ /s)	v (m/s)	D_i (m)	ρ (kg/m ³)
Tramo 1	1,5147	21,5146	0,299	0,817
Tramo 2	1,5582	22,1325	0,299	0,817
Tramo 3	3,0729	21,3885	0,428	0,817
Tramo 4	3,0729	21,3885	0,428	0,817
Tramo 5	3,2477	18,3119	0,475	0,847

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Para la viscosidad de las corrientes se ha considerado la viscosidad del aire seco, puesto que, la precisión no diferiría demasiado de la viscosidad del aire a diferentes temperaturas y no se necesita tanta exactitud al querer calcular el número de Reynolds para ver el tipo de circulación. En la *Tabla A6.2*, se recopila las viscosidades y densidades del aire seco a diferentes temperaturas.

Tabla A6.2 Propiedades del aire seco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	$\mu \cdot 10^6$ (Pa·s)
15,00	1,225	18,02
30,00	1,164	18,72
160,00	0,8148	24,20
170,00	0,7968	24,62

La viscosidad resultante en los puntos de unión de los dos corrientes, como en los puntos de dilución, se puede determinar mediante la *Ecuación A6.1*.

$$\mu_f = \frac{Q_{v_h} \cdot \mu_h + Q_{v_d} \cdot \mu_d}{Q_{v_h} + Q_{v_d}} \quad (A6.1)$$

Donde:

$\mu_f \equiv$ Viscosidad resultante (Pa · s)

$Q_{v_h} \equiv$ Caudal volumétrico de humos (m³/s)

$Q_{v_d} \equiv$ Caudal volumétrico de aire seco (m³/s)

$\mu_h \equiv$ Viscosidad de la corriente de humos (Pa · s)

$\mu_d \equiv$ Viscosidad de la corriente de aire seco (Pa · s)

El movimiento del fluido es caracterizado a través del número de Reynolds, este se puede estimar por medio de la *Ecuación A6.2* que se muestra a continuación.

$$Re = \frac{v \cdot D_i \cdot \rho}{\mu} \quad (A6.2)$$

Donde:

$Re \equiv$ Número de Reynolds

$v \equiv$ Velocidad del fluido a través de la conducción (m/s)

$D_i \equiv$ Diámetro interno de la conducción (m)

$\rho \equiv$ Densidad del fluido que circula por dentro de la conducción (kg/m^3)

$\mu \equiv$ Viscosidad del fluido que circula por dentro de la conducción ($Pa \cdot s$)

La rugosidad relativa es aquello que tiene en cuenta las irregularidades que sufren las distintas conducciones comerciales, esta se puede determinar según la *Ecuación A6.3*. Para el caso estudiado la rugosidad propia de la conducción sería una de aceros comerciales ($\varepsilon = 0,00015$). [5]

$$Rugosidad\ relativa = \frac{\varepsilon}{D_i} \quad (A6.3)$$

Donde:

$\varepsilon \equiv$ Rugosidad propia de la conducción

Paralelamente, también es posible emplear un método gráfico para la obtención de la rugosidad relativa. Ver *Figura A6.1*.

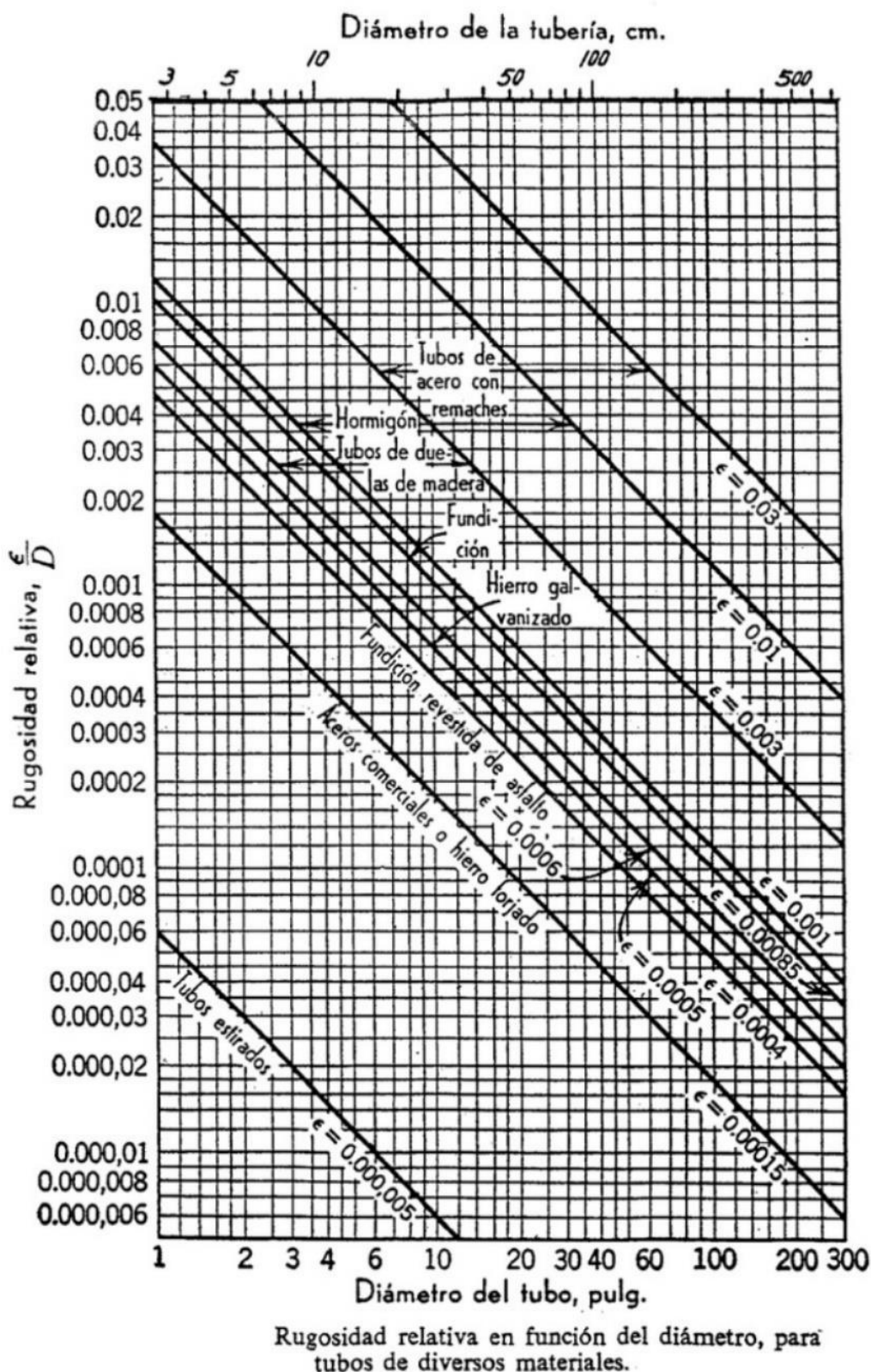


Figura A6.1 Gráfico para el cálculo de la rugosidad relativa [5]

Al haber determinado el número de Reynolds y la rugosidad relativa, es posible determinar el coeficiente de frotamiento, utilizado para calcular las diferentes pérdidas de presión en cada tramo. Se utiliza el gráfico de Moody mostrado en la *Figura A6.2*.

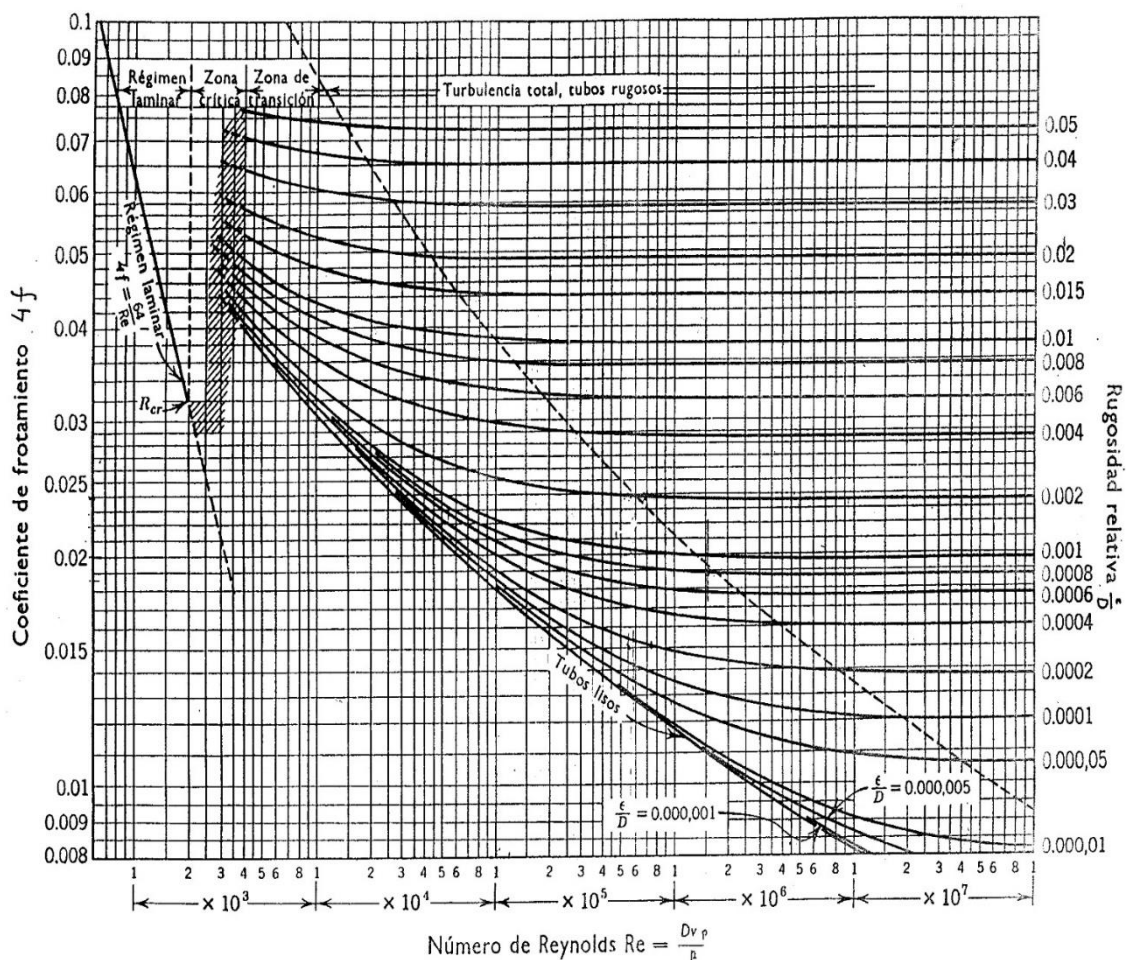


Figura A6.2 Gráfico de Moody para calcular el coeficiente de frotamiento [5]

Al conocer el coeficiente de frotamiento, es posible determinar las pérdidas ocasionadas por los tramos rectos presentes en las conducciones. Se emplea la ecuación de Fanning vista en la *Ecuación A6.4*.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \rho_f \quad (A6.4)$$

Donde:

$-\Delta P_{TR} \equiv$ Pérdidas de carga ocasionadas por los tramos rectos (Pa)

$f \equiv$ Coeficiente de frotamiento

$L \equiv$ Longitud del tramo recto (m)

En cuanto al cálculo de las pérdidas de carga que ocasionan los diferentes accidentes, se utiliza la Ecuación A6.5.

$$-\Delta P_{AC} = \sum k \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho_f \quad (A6.5)$$

Donde:

$-\Delta P_{AC} \equiv$ Pérdidas de carga ocasionadas por los distintos accidentes (Pa)

$k \equiv$ Constante característica para cada tipo de accidente

Las constante característica es diferente según el tipo de accidente. En la *Tabla A6.3* se muestra un resumen de los diferentes accidentes presentes en cada tramo y la longitud de los tramos rectos.

Tabla A6.3 Resumen de los accidentes y tramos rectos [5]

	Nombre del accidente	Cantidad	k	Tramos rectos (m)
Tramo 1	Codo de 90° standard	2	0,75	12
	Entrada ligeramente redondeada	2	0,23	
	T standard como división del caudal	1	1,00	
	Válvula de diafragma abierta	1	2,30	

Tabla A6.3 Resumen de los accidentes y tramos rectos (continuación)

Tramo 2	Codo de 90° standard	2	0,75	12
	Entrada ligeramente redondeada	2	0,23	
	T standard como división del caudal	1	1,00	
	Válvula de diafragma abierta	1	2,30	
Tramo 3	T standard como división del caudal	1	1,00	3,5
	Salida redondeada	1	1,00	
Tramo 4	Codo 90° standard	2	0,75	6
	Entrada ligeramente redondeada	1	0,23	
Tramo 5	Entrada ligeramente redondeada	1	0,23	6
	Salida redondeada	1	1,00	

Finalmente, con la suma de las últimas dos ecuaciones descritas se obtiene la *Ecuación A6.6* para determinar las pérdidas de carga totales.

$$-\Delta P = (-\Delta P_{TR}) + (-\Delta P_{AC}) \quad (A6.6)$$

Donde:

$$-\Delta P \equiv \text{Pérdidas de carga totales (Pa)}$$

6.1. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 1

Haciendo uso de la *Tabla A6.1*, *Tabla A6.2* y la *Ecuación A6.1* es posible estimar la viscosidad utilizada para los cálculos de este primer tramo.

$$\mu_f = \frac{1,4311 \cdot 24,62 \cdot 10^{-6} + 0,0836 \cdot 18,72 \cdot 10^{-6}}{1,4311 + 0,0836} = 24,29 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Seguidamente, con los datos de la *Tabla A6.1* y la viscosidad obtenida, es posible aplicar la *Ecuación A6.2* para calcular el número de Reynolds.

$$Re = \frac{21,5146 \cdot 0,299 \cdot 0,817}{24,29 \cdot 10^{-6}} = 2,16 \cdot 10^5$$

Aplicando la *Ecuación A6.3* se puede determinar la rugosidad relativa utilizando el diámetro interno de la conducción y la rugosidad propia de esta.

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,00015}{0,299} = 5,0167 \cdot 10^{-4}$$

Con el gráfico de Moody de la *Figura A6.2* se puede determinar el coeficiente de frotamiento ($4f$) para este tramo.

$$4f = 0,0187$$

$$f = 0,0047$$

Con todo esto es posible aplicar la *Ecuación A6.4* para obtener las pérdidas de carga de los tramos rectos, la *Ecuación A6.5* para las pérdidas de carga de los accidentes y las pérdidas de carga totales de este tramo por medio de la *Ecuación A6.6*. Los datos utilizados provienen de la *Tabla A6.3*.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot 0,0047 \cdot 21,5146^2 \cdot \frac{12}{0,299} \cdot 0,817 = 142,67 Pa$$

$$-\Delta P_{AC} = (2 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,23 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2,30) \cdot \frac{21,5146^2}{2} \cdot 0,817$$

$$-\Delta P_{AC} = 994,59 Pa$$

$$-\Delta P = 142,67 + 994,59 = 1137,26 Pa$$

6.2. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 2

El segundo tramo es casi idéntico al primero, por tanto, por medio de la *Tabla A6.1*, *Tabla A6.2* y la *Ecuación A6.1* es posible estimar la viscosidad utilizada para los cálculos de este segundo tramo.

$$\mu_f = \frac{1,4722 \cdot 24,62 \cdot 10^{-6} + 0,0860 \cdot 18,72 \cdot 10^{-6}}{1,4722 + 0,0860} = 24,29 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Haciendo uso de los datos de la *Tabla A6.1* y la viscosidad obtenida, es posible aplicar la *Ecuación A6.2* para calcular el número de Reynolds.

$$Re = \frac{22,1325 \cdot 0,299 \cdot 0,817}{24,29 \cdot 10^{-6}} = 2,23 \cdot 10^5$$

Con la *Ecuación A6.3* se puede determinar la rugosidad relativa utilizando el diámetro interno de la conducción y la rugosidad propia de esta.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0,00015}{0,299} = 5,0167 \cdot 10^{-4}$$

Mediante el gráfico de Moody de la *Figura A6.2* se puede determinar el coeficiente de frotamiento ($4f$) para este tramo.

$$4f = 0,0186$$

$$f = 0,0047$$

Se aplica así, la *Ecuación A6.4* para obtener las pérdidas de carga de los tramos rectos, la *Ecuación A6.5* para las pérdidas de carga de los accidentes y las pérdidas de carga totales de este tramo por medio de la *Ecuación A6.6*. Los datos utilizados provienen de la *Tabla A6.3*.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot 0,0047 \cdot 22,1325^2 \cdot \frac{12}{0,299} \cdot 0,817 = 150,98 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P_{AC} = (2 \cdot 0,75 + 2 \cdot 0,23 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2,30) \cdot \frac{22,1325^2}{2} \cdot 0,817$$

$$-\Delta P_{AC} = 1052,54 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P = 150,98 + 1052,54 = 1203,52 \text{ Pa}$$

6.3. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 3

En el tercer tramo de la conducción se produce la unión de las corrientes del tramo 1 y 2, se puede determinar la viscosidad resultante con los datos provenientes de la *Tabla A6.1*, *Tabla A6.2*, para luego emplear la *Ecuación A6.1*.

$$\mu_f = \frac{1,5147 \cdot 24,29 \cdot 10^{-6} + 1,5582 \cdot 24,29 \cdot 10^{-6}}{1,5147 + 1,5582} = 24,29 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Haciendo uso de los datos de la *Tabla A6.1* y la viscosidad obtenida, es posible aplicar la *Ecuación A6.2* para calcular el número de Reynolds.

$$Re = \frac{21,3885 \cdot 0,428 \cdot 0,817}{24,29 \cdot 10^{-6}} = 3,07 \cdot 10^5$$

Utilizando la *Ecuación A6.3* se puede determinar la rugosidad relativa utilizando el diámetro interno de la conducción y la rugosidad propia de esta.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0,00015}{0,428} = 3,5077 \cdot 10^{-4}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Con el gráfico de Moody de la *Figura A6.2* se puede determinar el coeficiente de frotamiento ($4f$) para este tramo.

$$4f = 0,0173$$

$$f = 0,0043$$

Se aplica así, la *Ecuación A6.4* para obtener las pérdidas de carga de los tramos rectos, la *Ecuación A6.5* para las pérdidas de carga de los accidentes y las pérdidas de carga totales de este tramo por medio de la *Ecuación A6.6*. Los datos utilizados provienen de la *Tabla A6.3*.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot 0,0043 \cdot 21,3885^2 \cdot \frac{3,5}{0,428} \cdot 0,817 = 26,28 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P_{AC} = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 1) \cdot \frac{21,3885^2}{2} \cdot 0,817 = 373,75 \text{ Pa}$$

Al ser el Venturi un accidente peculiar, al estar este ubicado en un tramo lo suficientemente pequeño, la pérdida de presión se podría estimar como el 10% de la pérdida de carga en el tramo recto.

$$-\Delta P_V = (-\Delta P_{TR}) \cdot 0,1 = 2,63 \text{ Pa}$$

Las pérdidas de carga totales de este tercer tramo corresponderían a la suma de las pérdidas de los tramos rectos, del Venturi y de los accidentes.

$$-\Delta P = 26,28 + 2,63 + 373,7 = 402,61 \text{ Pa}$$

6.4. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 4

El cuarto tramo corresponde a la salida del filtro de mangas, la corriente sigue teniendo el mismo caudal volumétrico y, por tanto, misma velocidad y diámetro que la del tercer tramo, pero con un ligero cambio de temperatura. Pese a esto, los datos empleados para el cálculo se han considerado iguales al variar muy poco los unos de los otros.

Partiendo de los resultados del tramo 3, con la *Ecuación 6.4* para obtener las, la *Ecuación A6.5* y la *Ecuación A6.6*, se calcula las pérdidas de carga para este tramo. Con los datos provenientes de la *Tabla A6.3* se obtienen los siguientes resultados.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot 0,0043 \cdot 21,3885^2 \cdot \frac{6}{0,428} \cdot 0,817 = 45,06 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P_{AC} = (2 \cdot 0,75 + 1 \cdot 0,23) \cdot \frac{21,3885^2}{2} \cdot 0,817 = 323,29 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P = 45,06 + 323,29 = 368,35 \text{ Pa}$$

6.5. PÉRDIDAS DE CARGA TRAMO 5

Para el quinto y último tramo del sistema de depuración, se tiene al inicio de este la unión de la corriente tratada con la corriente de aire seco proveniente del exterior. Utilizando los datos de la *Tabla A6.1*, *Tabla A6.2* y la *Ecuación A6.1* se determina la viscosidad resultante.

$$\mu_f = \frac{3,0729 \cdot 24,62 \cdot 10^{-6} + 0,1748 \cdot 18,02 \cdot 10^{-6}}{3,0729 + 0,1748} = 24,27 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Se puede determinar seguidamente el número de Reynolds con los datos de la *Tabla A6.1* y la *Ecuación A6.2*.

$$Re = \frac{18,3119 \cdot 0,475 \cdot 0,847}{24,27 \cdot 10^{-6}} = 3,04 \cdot 10^5$$

Utilizando la *Ecuación A6.3* se puede determinar la rugosidad relativa utilizando el diámetro interno de la conducción y la rugosidad propia de esta.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0,00015}{0,475} = 3,1579 \cdot 10^{-4}$$

Mediante el gráfico de Moody de la *Figura A6.2* se puede determinar el coeficiente de frotamiento ($4f$) para este tramo.

$$4f = 0,0170$$

$$f = 0,0043$$

Finalmente, aplicando la *Ecuación A6.4*, la *Ecuación A6.5* y la *Ecuación A6.6*, se pueden determinar las pérdidas de carga correspondientes a este último tramo. Se utilizan a su vez, los datos de la *Tabla A6.3*.

$$-\Delta P_{TR} = 2 \cdot 0,0043 \cdot 18,3119^2 \cdot \frac{6}{0,475} \cdot 0,847 = 30,85 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P_{AC} = (1 \cdot 0,23 + 1 \cdot 1) \cdot \frac{18,3119^2}{2} \cdot 0,847 = 174,67 \text{ Pa}$$

$$-\Delta P = 30,85 + 188,48 = 205,52 \text{ Pa}$$

Al haber calculado las pérdidas de carga de todos los tramos, se obtienen unas pérdidas totales de 3317,41 Pa, sin considerar las del filtro de mangas. Las pérdidas de carga en el interior del filtro de mangas no deberían de ser demasiado grandes, para no sobrepasar los 5000 Pa comentados al principios del apartado.

7. EQUIPOS DE DEPURACIÓN

El filtro de mangas pese a ser un equipo con diseños y métodos de operación sencillos, este requiere de una serie de correctas elecciones en cuanto al material más adecuado para las mangas, el método de limpieza de las mangas, la selección del número óptimo de mangas a instalar en función a la corriente a depurar y las pérdidas de carga ocasionadas por el filtro de mangas. Dentro del presente apartado se procede a detallar y explicar los cálculos y elecciones en relación a los aspectos comentados.

7.1. MATERIAL DE LAS MANGAS

La adecuada selección del tipo de material filtrante viene condicionada por una serie de factores entre los cuales se puede destacar: temperatura de operación, características físico-químicas que presentan las partículas, humedad presente en la corriente a depurar, resistencia mecánica presente por las mangas, velocidad de filtración y el método de limpieza empleado para las mangas. Se en la *Tabla A7.1* los principales factores para la selección del material filtrante.

Tabla A7.1 Características de distintos tipos de fibras para las mangas [1]

Fibra	Poliamídico	Politetrafluoroetilénica	Arammídica	Poliamídica aromática
Nombre	Nylon	Teflón	Nomex	Nomex-Teflonado
Temperatura máxima				
Continuo (°C)	100-110	240-260	200-220	190-210
Puntual (°C)	120	280	260	250
Resistencia química				
Ácidos	Muy baja	Excelente	Baja	Buena
Bases	Buena	Excelente	Buena	Excelente
Oxidantes	Excelente	Excelente	Buena	Excelente
Disolventes	Baja	Excelente	Buena	Excelente
Hidrólisis	Baja	Excelente	Baja	Buena
Coste relativo	Medio	Muy alto	Alto	Alto

Al haber contemplado las diferentes alternativas, se ha buscado una relación de temperatura de operación adecuada respecto al proceso planteado, una buena resistencia mayormente a los ácidos al ser estos los principales contaminantes a tratar y de forma secundaria, el precio asociado.

El Nylon fue descartado al no cumplir con la temperatura de operación, que para el caso estudiado sería en torno a los 160 °C, aparte de no presentar una buena resistencia a los ácidos.

Entre las opciones restantes, al no disponer el Nomex de una buena resistencia a ácidos fue también descartado.

Finalmente, el Nomex-Teflonado, el cual es Nomex pasado por un baño de Teflón para así tener una capa de sus buenas propiedades sin su alto coste, se presenta como la mejor opción en cuanto a las propiedades que presenta, los intervalos de temperatura y el coste asociado.

7.2. MÉTODO DE LIMPIEZA DE LAS MANGAS

Es importante a su vez, una óptima selección del método de limpieza de las mangas. Donde existen tres mecanismos principales, siendo estos el de sacudida, contracorriente y chorro de aire a presión.

Se puede estimar que la vida útil de las mangas es determinada por el ataque químico sufrido en la depuración y por el esfuerzo mecánico producido en la limpieza. En la *Tabla A7.2* se muestran las velocidades de filtración según los distintos métodos de limpieza utilizados.

Tabla A7.2 Relaciones de filtración [1]

Método de limpieza	Relación de filtración (m ³ /min/m ²)
Sacudida	0,30-0,80
Contracorriente	0,30-0,90
Chorro de aire a presión	1,45-2,00

Entre las distintas alternativas presentes, al ser la corriente a tratar una procedente de dos hornos de cocción, se estaría buscando una gran velocidad de filtración para evitar así el utilizar una gran área de filtración. Se ha seleccionado de esta forma, la limpieza por chorro de aire a presión.

7.3. CARACTERIZACIÓN DEL FILTRO DE MANGAS

Al haber seleccionado el tipo de material y el método de limpieza de las mangas, se procede a detallar a continuación los cálculos realizados en torno al número de mangas a instalar y las pérdidas de carga en el interior del equipo.

7.3.1. NÚMERO DE MANGAS A INSTALAR

Para poder calcular el número de mangas a instalar, es necesario conocer el caudal a tratar, la velocidad de filtración y el área de cada una de las mangas. Se puede observar en la *Figura A7.1* el esquema correspondiente a la geometría de las mangas.

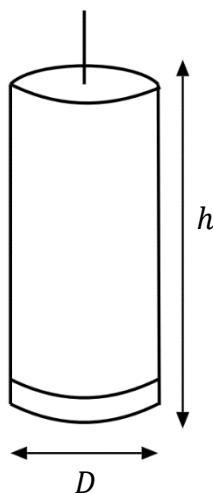


Figura A7.1 Esquema de la geometría de las mangas en el interior del filtro

En la *Tabla A7.3* se recopilan los valores del diámetro y altura seleccionados para el filtro de mangas, a partir de catálogos comerciales, como a su vez el caudal a tratar que corresponde al caudal del tramo 3 el cual será introducido al filtro de mangas y la velocidad de filtración es de 1,35 m/min al querer que se trabaje con una velocidad aproximada de 80 m/h, al buscar que el filtro de mangas se comporte como un reactor y no solamente como meramente de separación física. [1] [15]

Tabla A7.3 Parámetros para el cálculo de mangas a instalar

	Q _v (m ³ /s)	Q _v (m ³ /h)	v _f (m/min)	v _f (m/h)	h (m)	D (m)
Valor	3,0729	11062,4400	1,35	81,00	2	0,25

El número de mangas a instalar se pueden obtener a partir de la definición de velocidad de filtración que se observa en la *Ecuación A7.1*.

$$v_f = \frac{Q_v}{A_m \cdot n}$$
$$n = \frac{Q_v}{A_m \cdot v_f} \quad (A7.1)$$

Por otro lado, el área de cada manga se puede determinar a partir de la geometría de las mangas. Ver *Ecuación A7.2*.

$$A_m = \pi \cdot D \cdot h + \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (A7.2)$$

Donde:

$v_f \equiv$ Velocidad de filtración (m/h)

$Q_v \equiv$ Caudal volumétrico de corriente contaminante a tratar (m³/h)

$A_m \equiv$ Área de las mangas (m²)

$n \equiv$ Número de mangas

Con todo esto, es posible utilizar los datos de la *Tabla A7.3* para calcular el área de cada manga con la *Ecuación A7.2* y, por último, el número de mangas con la *Ecuación A7.1*.

$$A_m = \pi \cdot 0,25 \cdot 2 + \frac{\pi}{4} \cdot 0,25^2 = 1,62 \text{ m}^2$$

$$n = \frac{11062,4400}{1,62 \cdot 81} = 85$$

Se obtiene así que el filtro de mangas contaría con 85 mangas en su interior. La magnitud de este resultado puede parecer baja, pero se debe considerar que el caudal a tratar al no ser una empresa de grandes caudales de producción, no se precisarían de tantas mangas.

A su vez, el filtro de mangas seleccionado tiene una dimensiones muy reducidas, las cuales son las requeridas para el sistema que se está planteando, comparado los utilizados en las grandes industrias.

7.3.2. PÉRDIDAS DE CARGA DEL FILTRO DE MANGAS

Las pérdidas de carga dentro del filtro de mangas se deben principalmente a causa del elemento filtrante, en este caso las mangas, y la acumulación de las partículas en la mismas mangas. Se pueden calcular las pérdidas de carga totales sujetas al filtro de mangas mediante la *Ecuación A7.3*.

$$-\Delta P_{FM} = (-\Delta P_{Filtro}) + (-\Delta P_{Polvo}) = K_1 \cdot v_f + K_2 \cdot C \cdot v_f^2 \cdot t \quad (A7.3)$$

Donde:

$K_1 \equiv$ Coeficiente de resistencia de la manga acondicionada ((kg · s)/m²)

$K_2 \equiv$ Coeficiente de resistencia del polvo (1/s)

$C \equiv$ Concentración de polvo a la entrada (kg/m³)

$t \equiv$ Tiempo transcurrido desde la última limpieza (s)

Los valores de los coeficientes de resistencia están comprendidos en los siguientes intervalos: [1]

- K_1 : 2000-12000 (kg·s)/m²
- K_2 : 13000-700000 1/s

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

En cuanto a la concentración de polvo, esta se puede determinar al conocer el caudal másico de residuo formado y dividiendo este entre el caudal volumétrico de entrada al filtro de mangas. Ver *Ecuación A7.4*.

$$C = \frac{R_T}{Q_v} \quad (A7.4)$$

Donde:

$$R_T \equiv \text{Residuo total obtenido (kg/h)}$$

El residuo en caso de utilizar bicarbonato de sodio sería el correspondiente a la formación de NaF el cual sería 1,89 kg/h. Se puede calcular así con la *Ecuación A7.4* la concentración de polvo a la entrada.

$$C = \frac{1,89}{11062,4400} = 1,7084 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$$

El tiempo desde la última limpieza sería el representativo de los intervalos de limpieza que se usaría dentro del sistema de depuración. Se ha considerado un periodo de 15 minutos (900 s) entre cada limpieza, debido principalmente que el caudal volumétrico de entrada no es muy grande y no se prevé que las mangas se tengan que limpiar tan seguidamente. Este valor ha sido seleccionado también en bases a la recomendación de las fuentes bibliográficas de buscar tener unas pérdidas de carga comprendidas entre 490 y 1470 Pa. [17]

Se detallan en la *Tabla A7.4* los valores seleccionados para el cálculo de las pérdidas de carga correspondientes al filtro de mangas.

Tabla A7.4 Parámetros para el cálculo de las pérdidas de carga del filtro de mangas

	K_1 ((kg·s)/m ²)	K_2 (1/s)	v_f (m/s)	$C \cdot 10^4$ (kg/m ³)	t (s)
Valor	30000	300000	0,023	1,7084	900

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Con los valores de la *Tabla A7.4* dentro de la *Ecuación A7.3* es posible determinar las pérdidas de carga totales del filtro de mangas.

$$-\Delta P_{FM} = 30000 \cdot 0,023 + 300000 \cdot 1,7084 \cdot 10^{-4} \cdot 0,023^2 \cdot 900$$

$$-\Delta P_{FM} = 714,40 \text{ Pa}$$

Se obtienen así unas pérdidas de carga que se ajustan al intervalo mencionado anteriormente, afirmando de esta forma que el valor seleccionados son satisfactorios en relación con los conceptos teóricos.

Por otro lado, el intervalo de limpieza se ajusta adecuadamente al caso propuesto, teniendo un pequeño margen de flexibilidad en caso de querer optar por unos intervalos de limpieza más largos.

8. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LOS VENTILADORES

Para estimar la potencia necesaria del ventilador a instalar, es necesario conocer las pérdidas de carga a vencer por el ventilador, el caudal volumétrico resultante posterior al ventilador en condiciones reales y el rendimiento del ventilador, el cual para los ventiladores comerciales suele estar fijado en 70%. Ver *Ecuación 8A.1*.

$$P = \frac{Q_v \cdot (-\Delta P) \cdot 10^{-3}}{\eta} \quad (A8.1)$$

Donde:

$P \equiv$ Potencia del ventilador (kW)

$Q_v \equiv$ Caudal volumétrico entrante al ventilador (m^3/s)

$\Delta P \equiv$ Pérdidas de carga totales posteriores al ventilador (Pa)

$\eta \equiv$ Rendimiento del ventilador

8.1. VENTILADORES AL INICIO DEL SISTEMA

En cuanto a los ventiladores 1 y 2, estos son utilizados únicamente para inyectar aire seco en el sistema y no tienen ninguna función de subsanar las pérdidas de presión. Estos ya están instalados de por sí, al estar estos conectados al horno de cocción.

8.2. VENTILADOR AL FINAL DEL SISTEMA

Considerando el caudal volumétrico posterior a la unión con la corriente de aire seco, el cual es $3,2477 m^3/s$ y que las pérdidas de carga totales antes del ventilador son $4031,66 Pa$, se puede aplicar la *Ecuación A8.1* para calcular la potencia del ventilador 3.

$$P = \frac{3,2477 \cdot 4031,66 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 18,71 \text{ kW}$$

Se obtiene así una potencia a instalar de $18,71 \text{ kW}$ para vencer las pérdidas de carga acumuladas a lo largo del sistema de depuración posterior a este. Se ha visto prudente el instalar una potencia mayor de 25 kW y $2,5 \text{ kW}$ para los ventiladores 1 y 2.

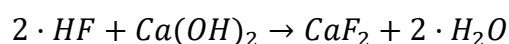
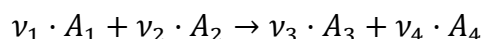
9. CÁLCULOS PARA LA SELECCIÓN DEL REACTIVO

En el presunto apartado se adjuntan los cálculos realizados para poder seleccionar el reactivo óptimo entre las dos alternativas propuestas.

9.1. CÁLCULO DE LOS CAUDALES MÁSICOS A APORTAR

9.1.1. CAUDAL MÁSICO PURO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO

Para determinar la cantidad de reactivo puro a adicionar al HF para que reaccione y forme un compuesto sólido retenible para el filtro de mangas, se debe conocer la estequiometría de la reacción.



En la *Tabla A9.1* se adjuntan los valores de los coeficientes estequiométricos de la reacción, el componente clave y los pesos moleculares para los cálculos posteriores.

Tabla A9.1 Datos necesarios para determinar la cantidad de Ca(OH)₂ a aportar

Especie	A _j	ν _j	PM _j (kg/kmol)
HF	A ₁ =A _k	-2	20,0
Ca(OH) ₂	A ₂	-1	74,1
CaF ₂	A ₃	1	78,0
H ₂ O	A ₄	2	18,0

Suponiendo una base de cálculo de caudal másico a tratar de HF de 1 kg/h, es posible determinar el caudal molar de HF por medio de la *Ecuación A9.1*.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

$$F_k = \frac{m_k}{PM_k}$$
$$F_{HF} = \frac{m_{HF}}{PM_{HF}} \quad (A9.1)$$

Donde:

$F_k \equiv F_{HF} \equiv$ Caudal molar del fluoruro de hidrógeno (kmol/h)

$m_k \equiv m_{HF} \equiv$ Caudal másico del fluoruro de hidrógeno (kg/h)

$PM_k \equiv PM_{HF} \equiv$ Peso molecular del fluoruro de hidrógeno (kg/kmol)

Con los datos de la *Tabla A9.1* y el caudal másico supuesto es posible aplicar la *Ecuación A9.1* para determinar el caudal molar buscado.

$$F_{HF} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ kmol/h}$$

Al haber determinado el caudal molar del componente clave, en este caso el fluoruro de hidrógeno es posible utilizar la estequiometría de la reacción para determinar el caudal molar de las otras especies que intervienen. Ver *Ecuación A9.2*.

$$F_j = F_k \cdot \frac{\nu_j}{\nu_k}$$
$$F_{Ca(OH)_2} = F_{HF} \cdot \frac{\nu_{Ca(OH)_2}}{\nu_{HF}} \quad (A9.2)$$

Donde:

$F_j \equiv F_{Ca(OH)_2} \equiv$ Caudal molar de hidróxido de calcio (kmol/h)

$\nu_j \equiv \nu_{Ca(OH)_2} \equiv$ Coeficiente estequiométrico de hidróxido de calcio

$\nu_k \equiv \nu_{HF} \equiv$ Coeficiente estequiométrico del fluoruro de hidrógeno

Utilizando los datos de la *Tabla A9.1* y la *Ecuación A9.2* se puede determinar el caudal molar del hidróxido de calcio.

$$F_{Ca(OH)_2} = 0,05 \cdot \frac{(-1)}{(-2)} = 0,025 \text{ kmol/h}$$

Se puede determinar el caudal másico puro de hidróxido de calcio empleando para ello la *Ecuación A9.3* vista a continuación.

$$m_{Ca(OH)_2} = F_{Ca(OH)_2} \cdot PM_{Ca(OH)_2} \quad (A9.3)$$

Donde:

$$m_{Ca(OH)_2} \equiv \text{Caudal másico puro de hidróxido de calcio (kg/h)}$$

$$PM_{Ca(OH)_2} \equiv \text{Peso molecular del hidróxido de calcio (kg/kmol)}$$

El peso molecular del hidróxido de calcio se puede consultar en la *Tabla A9.1* y con este, es posible aplicar el cálculo requerido.

$$m_{Ca(OH)_2} = 0,025 \cdot 74,1 = 1,85 \text{ kg/h}$$

Se puede así comprobar que se necesitarían consumir 1,85 kg/h de $Ca(OH)_2$ por cada 1 kg/h de HF, pero cantidad a reaccionar es para el caso de que la reacción tenga lugar de forma estequiométrica, pero en muchas ocasiones no sucede esto, sino que la cantidad de $Ca(OH)_2$ necesaria a aportar depende en gran medida de la concentración inicial de flúor.

Para poder entender mejor esta situación, la razón equivalente del hidróxido cálcico es definida como el cociente entre la cantidad realmente necesaria de hidróxido cálcico que se debe aportar para que se dé lugar la reacción, y la cantidad estequiométricamente necesaria. Si la reacción sí se produce de forma estequiométrica, la razón equivalente será igual a uno.

Se ha representado así la razón equivalente obtenida de forma experimental de cuatro concentraciones iniciales de HF a depurar (C_1 , C_2 , C_3 y C_4), respecto al rendimiento alcanzado. Donde las concentraciones iniciales van de mayor a menor ($C_1 > C_2 > C_3 > C_4$). En la *Figura A9.1* se puede ver dicha representación.

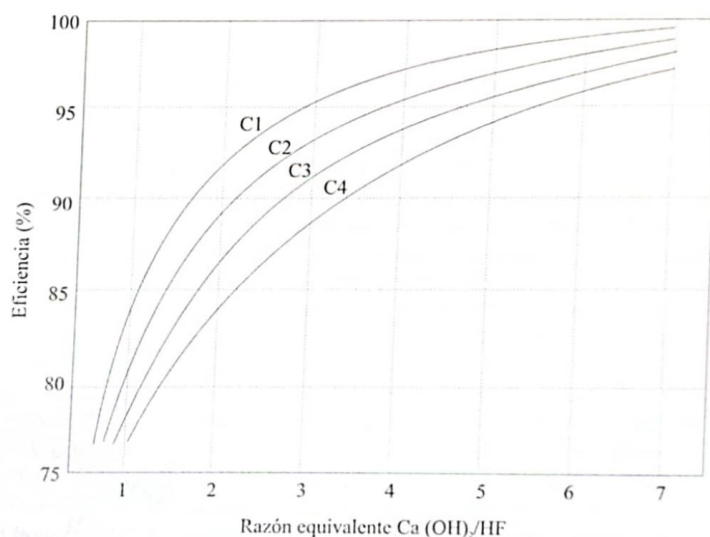


Figura A9.1 Evolución del rendimiento respecto a la razón equivalente de Ca(OH)_2 [3]

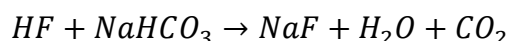
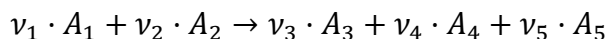
Se puede observar de esta forma, que, al aumentar la concentración inicial de HF para un mismo rendimiento, se produce una disminución en la razón equivalente.

Las concentraciones utilizadas tienen un rango de $10\text{-}50\text{ mg/Nm}^3$, si se quiere respetar la normativa vigente más estricta y tener una concentración de HF a la salida menor que 5 mg/Nm^3 y un alto rendimiento del orden del 90%, se estima que la razón equivalente sería cercana a 3,5 (parecida a la C_4 que corresponde al rango inferior de valores mencionado).

Dentro de la corriente gaseosa pueden existir compuestos que reaccionen con el Ca(OH)_2 , tales como el cloro o el azufre. Se ha considerado así un consumo cuatro veces mayor de Ca(OH)_2 a la cantidad estequiométrica necesaria para eliminar la cantidad de HF. Si se considera la pureza del Ca(OH)_2 comercial que es aproximadamente del 90%, para un rendimiento del 90% se necesitarían aportar $8,22\text{ kg/h}$ de Ca(OH)_2 por 1 kg/h de HF.

9.1.2. CAUDAL MÁSSICO PURO DE BICARBONATO DE SODIO

Análogamente al procedimiento de obtención del caudal másico puro de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para el caso del bicarbonato de sodio es necesario conocer la estequiometría de la reacción e identificar el componente clave de esta.



Se ha construido la *Tabla A9.2*, por medio de la cual se recopilan los coeficientes estequiométricos y los pesos moleculares de todas las especies que intervienen en la reacción.

Tabla A9.2 Datos necesarios para determinar la cantidad de NaHCO_3 a aportar

Especie	A_j	ν_j	PM _j (kg/kmol)
HF	$A_1=A_k$	-1	20
NaHCO ₃	A_2	-1	84
NaF	A_3	1	42
H ₂ O	A_4	1	18
CO ₂	A_5	1	44

El caudal molar del componente clave, es decir, del fluoruro de hidrógeno es el mismo que el calculado en el apartado anterior. Se utiliza la *Ecuación A9.4* para determinar el caudal molar del bicarbonato de sodio.

$$F_j = F_k \cdot \frac{\nu_j}{\nu_k}$$

$$F_{\text{NaHCO}_3} = F_{\text{HF}} \cdot \frac{\nu_{\text{NaHCO}_3}}{\nu_{\text{HF}}} \quad (\text{A9.4})$$

Donde:

$$F_j \equiv F_{NaHCO_3} \equiv \text{Caudal molar de bicarbonato de sodio (kmol/h)}$$

$$\nu_j \equiv \nu_{NaHCO_3} \equiv \text{Coeficiente estequiométrico del bicarbonato de sodio}$$

A partir de los coeficientes recopilados en la *Tabla A9.2* y la *Ecuación A9.4*, se determina el caudal molar de bicarbonato de sodio.

$$F_{NaHCO_3} = 0,05 \cdot \frac{(-1)}{(-1)} = 0,05 \text{ kmol/h}$$

La *Ecuación A9.5* permite obtener el caudal másico de bicarbonato de sodio necesario para reaccionar con el fluoruro de hidrógeno.

$$m_{NaHCO_3} = F_{NaHCO_3} \cdot PM_{NaHCO_3} \quad (A9.5)$$

Donde:

$$m_{NaHCO_3} \equiv \text{Caudal másico de bicarbonato de sodio (kg/h)}$$

$$PM_{NaHCO_3} \equiv \text{Peso molecular del bicarbonato de sodio (kg/kmol)}$$

Con el peso molecular del $NaHCO_3$ procedente de la *Tabla A9.2*, es posible aplicar la presunta ecuación descrita anteriormente.

$$m_{NaHCO_3} = 0,05 \cdot 84 = 4,2 \text{ kg/h}$$

Se obtiene así que el consumo para esta reacción sería de 4,2 kg/h de $NaHCO_3$ por 1 kg/h de HF. Como el bicarbonato sódico presenta un muy buen rendimiento de depuración, las relaciones estequiométricas son muy cercanas a la unidad. Por tanto, no es necesario el uso de la razón.

9.2. CÁLCULO DEL RESIDUO FORMADO

9.2.1. RESIDUO FORMADO POR EL HIDRÓXIDO DE CALCIO

Empleando hidróxido de calcio como reactivo se tendría que el residuo formado sería la suma del reactivo en exceso, esto es debido a que se trabaja con ratios estequiométricos distintos a uno, y al fluoruro de calcio formado. Esto se puede observar a continuación en la *Ecuación A9.6*.

$$m_{residuo} = m_{Ca(OH)_2EXCESO} + m_{CaF_2} \quad (A9.6)$$

Donde:

$$m_{residuo} \equiv \text{Caudal másico de residuo obtenido (kg/h)}$$

$$m_{Ca(OH)_2EXCESO} \equiv \text{Caudal másico de hidróxido de calcio en exceso (kg/h)}$$

$$m_{CaF_2} \equiv \text{Caudal másico de fluoruro de calcio (kg/h)}$$

El exceso originado a partir del reactivo se expresa como la diferencia de la cantidad necesaria de reactivo y la estequiométricamente necesaria. Ver *Ecuación A9.7*.

$$F_{Ca(OH)_2EXCESO} = F_{Ca(OH)_2NECESARIOS} - F_{Ca(OH)_2ESTEQUIOMÉTRICOS} \quad (A9.7)$$

$$F_{Ca(OH)_2EXCESO} = 8,22 - 1,85 = 6,37 \text{ kg/h en exceso}$$

La producción del fluoruro de calcio viene dada por la *Ecuación 9.8*, donde se relacionan las cantidades iniciales de las especies, sus coeficientes estequiométricos y el grado de conversión. Se ha considerado una conversión del 90%.

$$F_{CaF_2} = F_{CaF_2_0} - F_{HF_0} \cdot \frac{\nu_{CaF_2}}{\nu_{HF}} \cdot X \quad (9.8)$$

Donde:

$F_{CaF_2} \equiv$ Caudal molar final de fluoruro de calcio (kmol/h)

$F_{CaF_2_0} \equiv$ Caudal molar inicial de fluoruro de calcio (kmol/h)

$F_{HF_0} \equiv$ Caudal molar inicial de fluoruro de hidrógeno (kmol/h)

$\nu_{CaF_2} \equiv$ Número estequiométrico del fluoruro de calcio

$\nu_{HF} \equiv$ Número estequiométrico del fluoruro de hidrógeno

$X \equiv$ Grado de conversión

Aplicando la *Ecuación A9.8* recién descrita, se obtiene el caudal molar de fluoruro de calcio a partir de la conversión del fluoruro de hidrógeno.

$$F_{CaF_2} = 0 - 0,05 \cdot \frac{1}{(-2)} \cdot 0,9 = 0,0225 \text{ kmol/h}$$

Para expresar el resultado obtenido en función de caudal másico, se multiplica por el respectivo peso molecular tal y como se detalla en la *Ecuación A9.9*.

$$m_{CaF_2} = F_{CaF_2} \cdot PM_{CaF_2} \tag{A9.9}$$

Donde:

$PM_{CaF_2} \equiv$ Peso molecular del fluoruro de calcio (kg/kmol)

El valor del peso molecular del fluoruro de calcio es de 78 kg/kmol, aplicando la *Ecuación A9.9* se obtiene el siguiente resultado.

$$m_{CaF_2} = 0,0225 \cdot 78 = 1,76 \text{ kg/h}$$

Finalmente, aplicando la *Ecuación A9.6* se suman los dos caudales máscicos obtenidos para tener así la cantidad de residuo total formado al utilizar hidróxido de calcio como reactivo.

$$m_{residuo} = 6,37 + 1,76 = 8,13 \text{ kg/h de residuo}$$

9.2.2. RESIDUO FORMADO POR EL BICARBONATO DE SODIO

El residuo asociado al utilizar bicarbonato de sodio, al utilizar ratios estequiométricos igual a la unidad, será igual a la cantidad de fluoruro de sodio formado.

El procedimiento es análogo a la obtención del fluoruro de calcio del apartado anterior. El caudal molar de fluoruro de sodio se obtiene mediante la *Ecuación A9.10*.

$$F_{NaF} = F_{NaF_0} - F_{HF_0} \cdot \frac{\nu_{NaF}}{\nu_{HF}} \cdot X \quad (A9.10)$$

Donde:

$$F_{NaF} \equiv \text{Caudal molar final de fluoruro de sodio (kmol/h)}$$

$$F_{NaF_0} \equiv \text{Caudal molar inicial de fluoruro de sodio (kmol/h)}$$

$$\nu_{NaF} \equiv \text{Número estequiométrico del fluoruro de sodio}$$

El cálculo se resuelve tal y como se muestra a continuación

$$F_{NaF} = 0 - 0,05 \cdot \frac{1}{(-1)} \cdot 0,9 = 0,045 \text{ kmol/h}$$

Con el caudal molar obtenido es posible multiplicar por el respectivo peso molecular para así obtener el caudal máscico de fluoruro de sodio, el cual es el respectivo residuo de la reacción que tiene lugar. Ver *Ecuación A9.11*.

$$m_{NaF} = F_{NaF} \cdot PM_{NaF} \quad (A9.11)$$

Donde:

$PM_{NaF} \equiv$ Peso molecular del fluoruro de sodio (kg/kmol)

$m_{NaF} \equiv$ Caudal másico de fluoruro de sodio (kg/h)

Conocido el valor del peso molecular del fluoruro de sodio, siendo este 42 kg/kmol, se obtiene el caudal másico de fluoruro de sodio.

$$m_{NaF} = 0,045 \cdot 42 = 1,89 \text{ kg/h de NaF}$$

9.3. CÁLCULO DEL COSTE ASOCIADO A CADA REACTIVO

Para elegir el mejor reactivo para hacerlo reaccionar con el HF, es importante conocer los precios anuales asociados a cada uno de los reactivos.

Por una parte, se debe considerar el coste de reacción del reactivo y por otra el coste de su tratamiento de residuos. En la *Tabla A9.3* se muestran dichos precios para cada uno de los reactivos.

Tabla A9.3 Precio de cada reactivo y de su tratamiento de residuos [18]

	Ca(OH) ₂	NaHCO ₃
Precio del reactivo (€/kg)	0,15	0,50
Precio del tratamiento de residuos (€/kg)	0,18	0,23

Es posible determinar los costes anuales, tanto del reactivo y de su tratamiento de residuos, mediante factores de conversión a partir de los caudales másicos puros obtenidos anteriormente y el residuo obtenido. Para el cálculo se ha considerado que el sistema de depuración funcionaría unos 330 días al año.

9.3.1. COSTE ASOCIADO AL USO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO

$$8,22 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 9.765,36 \text{ €/año}$$

$$8,13 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 0,18 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 11.590,13 \text{ €/año}$$

$$\text{Costes total} = 9.765,36 + 11.590,13 = 21.248,57 \text{ €/año}$$

9.3.2. COSTE ASOCIADO AL USO DE BICARBONATO DE SODIO

$$4,20 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 0,50 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 16.632,00 \text{ €/año}$$

$$1,89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 0,23 \frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 3.442,82 \text{ €/año}$$

$$\text{Costes total} = 16.632,00 + 3.442,82 = 20.074,82 \text{ €/año}$$

10. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DEL SILO

El presunto cálculo es elaborado para dimensionar el silo de almacenamiento de reactivo. Al ser el contaminante mayoritario el flúor, se han despreciado la cantidad de reactivo a reaccionar con los demás contaminantes, también entre otras cosas, porque estos sí cumplen con los Valores Límites de Emisión (VLE) establecidos.

Tal y como se ha comentado en el apartado del silo, este se ha propuesto para tener un diseño flexible en donde el tipo de reactivo utilizado podría cambiar o ser una mezcla de los reactivos propuestos.

Se puede utilizar para conocer la capacidad del silo como el cociente con el caudal másico diario necesario y la densidad del reactivo utilizado, multiplicado por el número de días de funcionamiento previsto. Ver *Ecuación A10.1*.

$$V_S = \frac{m_R}{\rho_R} \cdot d \quad (A10.1)$$

Donde:

$V_S \equiv$ Volumen del silo (m^3)

$m_R \equiv$ Caudal másico diario de reactivo necesario ($kg/día$)

$\rho_R \equiv$ Densidad del reactivo (kg/m^3)

$d \equiv$ Número de días de operación ($día$)

Se ha planteado el equipo para 7 días de operación, ahorrando así costes sujetos a la recarga y evitando posibles problemas de hidratación se obtiene lo siguiente. Con el caudal de reactivo siendo 100,8 kg/día y la densidad del bicarbonato de sodio 2173 kg/m³.

$$V_S = \frac{100,8}{2173} \cdot 7 = 0,325 m^3$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

En caso de que se pretenda cambiar de reactivo por diversas razones, se procede a realizar el mismo cálculo explicado anteriormente para conocer las dimensiones requeridas por el silo en caso de realizar dicho cambio. Utilizando hidróxido de calcio, el reactivo a aportar es de 197,29 kg/día y la densidad de este compuesto es de 2211 kg/m³.

$$V_s = \frac{197,28}{2211} \cdot 7 = 0,625 \text{ m}^3$$

Se puede comprobar de esta forma, que si se pretende cambiar de reactivo la capacidad del silo debería ser casi el doble que si se usara simplemente bicarbonato de sodio.

11. CÁLCULO DE LA CORRIENTE DEPURADA

A continuación, se detalla el cálculo de la corriente de HF depurada con el sistema propuesto frente a la corriente de HF sin depurar, pudiendo ver así la reducción estimada que este tipo de sistema puede llegar a suponer.

Es necesario conocer primero los caudales volumétricos salientes de cada horno, las concentraciones de HF, la producción anual de la empresa y el tiempo de operación de los hornos. Dichos datos se muestran en la *Tabla A11.1* a continuación.

Tabla A11.1 Resumen de los datos necesarios para el cálculo

	Q _v (Nm ³ /h)	c _{HF} (mg/Nm ³)	VLE (mg/Nm ³)	P (m ² /año)	t (días/año)
Horno 1	4.046	48,8	5	2.520.000	330
Horno 2	4.771	16,0			

Considerando que las corrientes saliente de los dos hornos se juntan, para luego ser llevadas al sistema de depuración, es posible determinar la reducción que se daría lugar si el valor final de la concentración se fija como el VLE y el valor inicial es la suma de las concentraciones de los hornos 1 y 2.

Utilizando la *Ecuación A11.1* detallada a continuación, se puede determinar le grado de conversión que se produciría.

$$c_{HF} = c_{HF_0} - c_{HF_0} \cdot \frac{v_{HF}}{v_{HF}} \cdot X$$

$$c_{HF} = c_{HF_0} \cdot (1 - X)$$

$$X = \frac{c_{HF_0} - c_{HF}}{c_{HF_0}} \quad (A11.1)$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Donde:

c_{HF} \equiv Concentración final de fluoruro de hidrógeno (mg/Nm^3)

c_{HF_0} \equiv Concentración inicial de fluoruro de hidrógeno (mg/Nm^3)

ν_{HF} \equiv Número estequiométrico del fluoruro de hidrógeno

X \equiv Grado de conversión

Con los datos procedentes de la *Tabla A11.1* y la *Ecuación 11.1* es posible determinar el grado de conversión.

$$X = \frac{5 - 64,8}{-64,8} = 0,923$$

Se obtiene que, con el sistema de depuración propuesto la concentración de HF se reduciría un 92,3 % hasta unos valores que sí cumplen con los valores fijados por la legislación vigente.

Se ha obtenido la cantidad de HF, en g/m^2 , que se emitiría con y sin el sistema de depuración propuesto para ver así la diferencia presente. El cálculo se ha realizado mediante factores de conversión con los datos de la *Tabla A11.1*.

$$64,8 \frac{mg HF}{Nm^3} \cdot \frac{1 g}{1000 mg} \cdot \frac{8817 Nm^3}{1 h} \cdot \frac{330 días}{1 año} \cdot \frac{24 h}{1 día} \cdot \frac{1 año}{2520000 m^2} = 1,800 \frac{g HF}{m^2}$$

$$5 \frac{mg HF}{Nm^3} \cdot \frac{1 g}{1000 mg} \cdot \frac{8817 Nm^3}{1 h} \cdot \frac{330 días}{1 año} \cdot \frac{24 h}{1 día} \cdot \frac{1 año}{2520000 m^2} = 0,139 \frac{g HF}{m^2}$$

12. ESTUDIO ECONÓMICO

Para el siguiente apartado, se muestran los cálculos realizados en cuando a la viabilidad de este proyecto. Este se realizó bajo la suposición de que la implementación del sistema diseñado se haría dentro de la misma empresa, en calidad de un organismo externo el cual es subcontratado por la empresa para reducir las emisiones de contaminantes.

12.1. COSTE DE LA INSTALACIÓN

Dentro de los costes asociados a la instalación se encuentran los costes sujetos a las conducciones a instalar, los diferentes accidentes utilizados, costes del silo y tornillo sin fin, costes del equipo de depuración, costes de los ventiladores y controladores.

12.1.1. COSTE DE LAS CONDUCCIONES Y ACCESORIOS

Para el cálculo del precio de los tramos rectos a instalar, se ha elaborado la *Tabla A12.1* donde se muestran los diámetros utilizados, los metros necesarios (considerando las salidas de emergencia y los tramos de dilución) y el precio de estos.

Tabla A12.1 Resumen de los precios de las conducciones

Tramos	De (m)	Di (m)	Longitud necesaria (m)	Precio (€/m)
1 y 2	0,316	0,299	28,0	8,19
3 y 4	0,451	0,428	10,5	9,16
5	0,502	0,475	7,0	13,32

A partir de los datos de la tabla anterior, es posible determinar el precio de las conducciones de cada uno de los tramos.

$$\text{Tramo 1 y 2: } 28,0 \cdot 8,19 = 229,32 \text{ €}$$

$$\text{Tramo 3 y 4: } 10,5 \cdot 9,16 = 96,18 \text{ €}$$

$$\text{Tramo 5: } 7 \cdot 13,32 = 93,24 \text{ €}$$

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Los costes totales de los tramos rectos es la suma del precio de los diferentes tramos.

$$P_{TR} = 229,32 + 96,18 + 93,24 = 418,74 \text{ €}$$

Los diferentes accesorios empleados en el sistema de depuración junto al precio de los tramos rectos suman una cifra total de 829,16 €. Esto es descrito con mayor profundidad dentro del apartado de *Presupuesto*.

12.1.2. COSTE DEL SILO Y TORNILLO DOSIFICADOR

Entre diferentes ofertas de mercado, un equipo de silo dosificador con una capacidad de 0,35 m³ (una opción muy ajustable para el caso que estudiado), junto a un tornillo sin fin de 3,5 kW de potencia tienen un coste de 2.500 €. De los cuales 1.600 € corresponden al silo y 900 € al tornillo sin fin.

12.1.3. COSTE DE LAS MANGAS

Es posible determinar el precio que supondrían las mangas, según el número a instalar y el material de estas con la *Ecuación A12.1*.

$$P_M = C_M \cdot A_M \cdot n \tag{A12.1}$$

Donde:

$$P_M \equiv \text{Precio de las mangas (€)}$$

$$C_M \equiv \text{Precio de mercado de las mangas (€/m}^2\text{)}$$

$$A_M \equiv \text{Área de cada manga (m}^2\text{)}$$

$$n \equiv \text{Número de mangas}$$

En la *Tabla A12.2* se muestra el precio de mercado de las mangas de Nomex Teflonado, junto a la resta de valores para el cálculo, la obtención de estos fue explicada en apartados posteriores.

Tabla A12.2 Precio de mercado de las mangas de Nomex Teflonado [20]

Material	C_M (€/m ²)	A_M (m ²)	n
Nomex Teflonado	72,5	1,62	85

Con los datos procedentes de la *Tabla A12.2* y la *Ecuación A12.1* es posible determinar el total de las mangas que se pretenden instalar.

$$P_M = 72,5 \cdot 1,62 \cdot 85 = 9.983,25 \text{ €}$$

12.1.4. COSTE DE LA INFRAESTRUCTURA DEL FILTRO

Para una estimación del precio del filtro de mangas, se ha consultado una serie de precios tabulados en función del caudal volumétrico a introducir al filtro. Se ha podido obtener una relación polinómica del precio estimado de un filtro de mangas, en función del caudal volumétrico a ser tratado. Ver *Ecuación A12.2*. [19]

$$P_F = -0,0001 \cdot Q_v^2 + 7,1345 \cdot Q_v + 7251,8 \quad (A12.2)$$

Donde:

$$P_F \equiv \text{Precio estimado del filtro de mangas (€)}$$

$$Q_v \equiv \text{Caudal volumétrico a introducir al filtro (m}^3\text{/h)}$$

El caudal volumétrico a introducir en el filtro de mangas es de 3,0727 m³/s o también 11062,44 m³/h. Conociendo este valor se puede aplicar la *Ecuación A12.2* para determinar el precio del filtro de mangas.

$$P_F = -0,0001 \cdot 11062,44^2 + 7,1345 \cdot 11062,44 + 7251,8 = 73939,02 \text{ €}$$

12.1.5. COSTE DEL MÉTODO DE LIMPIEZA

La acumulación progresiva de capas de polvo con el tiempo en las mangas da lugar a la necesidad de un equipo de limpieza. La instalación del equipo de aire a presión con una potencia de 5 kW para limpiar las mangas supone un coste de 376,82 €.

12.1.6. COSTE DE LOS VENTILADORES

En cuanto a los ventiladores encargados de introducir aire seco al sistema de depuración, los ventiladores 1 y 2 estarían ya instalados como adición a los mismos hornos de cocción. Pese a esto, se ha visto prudente el adquirir dos nuevos ventiladores en caso de que la potencia de los ya instalados no resulte suficiente a largo plazo. El coste de los ventiladores 1 y 2 con 2,5 kW es de 361,20 € cada uno de ellos, siendo 722,40 € el coste total de ambos.

El ventilador 3 cuenta con una mayor potencia a instalar (25 kW) que los otros ventiladores, teniendo así un precio más alto de 4.163,68 €. La suma de los tres ventiladores asciende hasta los 4.886,08 €.

12.1.7. COSTE DE LOS CONTROLADORES

Los controladores permiten detectar perturbaciones en el sistema y así poder actuar ante estos. Los controladores de presión tienen un coste de 121,75 €, mientras que el de los de temperatura es de 286,97 €. El precio de ambos controladores es 1.756,63 €.

12.1.8. COSTE TOTALES DE LA INSTALACIÓN

En caso de querer conocer la inversión anual de la instalación, se deben de contemplar los tiempos de amortización de los equipos instalados.

Las mangas suelen tener una vida útil entre 1-3 años, considerando que los caudales a tratar no son muy grandes se va a suponer una vida útil de dos años para obtener el coste anual de las mangas.

$$\text{Coste anual de las mangas} = \frac{9.983,25 \text{ €}}{2 \text{ años}} = 4.991,63 \text{ €/año}$$

Para el resto de los equipos, sumando el total de sus costes, y considerando un tiempo de amortización de 10 años se obtiene el coste anual de la resta de equipos.

$$\text{Coste} = \frac{(418,74 + 2.500 + 73.939,02 + 376,82 + 4.886,08 + 1.756,63) \text{ €}}{10 \text{ años}}$$

$$\text{Coste anual resto de los equipos} = \frac{83.876,47 \text{ €}}{10 \text{ años}} = 8.387,64 \text{ €/año}$$

Sumando el coste anual del resto de los equipos y el coste anual de las mangas, se obtiene el coste anual de los equipos.

$$\text{Coste anual de los equipos} = 4.991,63 + 8.387,64 = 13.379,27 \text{ €/año}$$

12.2. COSTE DE OPERACIÓN

El coste de operación del sistema está sujeto al coste del reactivo utilizado, la gestión del residuo y el coste eléctrico.

12.2.1. COSTE DEL REACTIVO UTILIZADO

Se ha considerado el uso de bicarbonato de sodio para el presunto cálculo. El caudal másico a aportar de bicarbonato de sodio es de 4,20 kg/h. Es posible estimar el precio del reactivo anual utilizando para un precio del bicarbonato de sodio de 0,5 €/kg y que los hornos de cocción operan 330 días/año.

$$4,20 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{330 \text{ días}}{\text{año}} \cdot \frac{0,5 \text{ €}}{\text{kg}} = 16.632,00 \text{ €/año}$$

12.2.2. COSTE GESTIÓN DEL RESIDUO

Respecto a la gestión de los residuos obtenidos, se ha contemplado que el debido tratamiento del residuo formado tendría un coste de 0,23 €/kg. Con un residuo obtenido

de 1,89 kg/h y el tiempo de operación de 330 días/año, se puede determinar el coste anual del residuo obtenido.

$$1,89 \frac{kg}{h} \cdot \frac{24 h}{1 día} \cdot \frac{330 días}{año} \cdot \frac{0,23 €}{kg} = 3.442,82 €/año$$

12.2.3. COSTE ELÉCTRICO

El coste eléctrico viene representado por la suma de las diferentes potencias utilizadas en el sistema, siendo estas la de los ventiladores, el equipo de aire a presión para la limpieza de las mangas y el tornillo sin fin. La potencia total siendo de 38,5 kW.

El precio de la electricidad media en España actualmente es de 0,35 €/(kW·h), conociendo esto y la operación de 330 días/año es posible determinar el coste eléctrico anual de la instalación.

$$38,5 kW \cdot \frac{0,35 €}{kW \cdot h} \cdot \frac{24 h}{1 día} \cdot \frac{330 días}{1 año} = 106.722,00 €/año$$

12.2.4. COSTE TOTAL DE OPERACIÓN ANUAL

El coste total de operación al año es viene dado por la suma del coste del reactivo utilizado, de la gestión de residuos y el de electricidad.

$$\text{Coste anual de operación} = 16.632,00 + 3.442,82 + 106.722,00$$

$$\text{Coste anual de operación} = 126.796,82 €/año$$

12.3. COSTE TOTAL

Finalmente, el coste total anual será la suma del coste anual de los equipos y el coste anual de operación. Dicho coste es de 140.041,39 €/año.

Para poder conocer el precio que supondría tratar con el sistema diseñado 1 m² de baldosas cerámicas, se calcula el coste específico al dividir el coste total entre la producción anual la cual es de 2.520.000 m²/año.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

$$\text{Coste específico} = \frac{140.041,39 \text{ €/año}}{2.520.000 \text{ m}^2/\text{año}} = 0,056 \text{ €/m}^2$$

Con este precio es posible establecer el coste que la empresa debería de pagar a la subcontrata para la depuración de los contaminantes gaseosos a la salida de los hornos de cocción.

13. ESTUDIO DE SEGURIDAD Y SALUD

Es dictaminado por la Ley 31/1995 de prevención de riesgos laborales que es obligatorio el realizar un estudio de prevención de riesgos laborales. Mediante este es posible el identificar los posibles riesgos, la magnitud y los daños que estos puedan ocasionar, valorizar sus consecuencias y establecer medidas correctivas las cuales sean sinónimas de garantías de seguridad.

Se ha utilizado para este estudio el método general de valoración de riesgos propuesto por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), el cual permite obtener un índice de tolerabilidad de acuerdo a una serie de criterios. Dichos criterios son mostrados en la *Tabla A13.1* que se muestra a continuación.

Tabla A13.1 Índice de tolerabilidad del método INSHT [7]

		Consecuencias		
		Leve	Importante	Serio
Probabilidad	Poco posible	Trivial	Tolerable	Moderado
	Posible	Tolerable	Moderado	Importante
	Casi seguro	Moderado	Importante	Intolerable

En base al índice de tolerabilidad que se obtenga, se deben de establecer una serie de medidas, los criterios de actuación para cada caso son los siguientes:

- Trivial: No se requiere de una acción en concreto.
- Tolerable: No requiere de ninguna mejora de la acción preventiva, pero requiere mejoras de bajo coste y de unas inspecciones periódicas.
- Moderado: Necesidad de una implicación para la reducción del riesgo por medio de las inversiones y el tiempo de intervención necesario.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

- **Importante:** Es indispensable reducir el riesgo antes de iniciar la actividad. Bajo el caso de estar ya realizando el trabajo, el tiempo de intervención debe ser inmediato.
- **Intolerable:** Es indispensable reducir el riesgo antes de iniciar la actividad.

A partir de la descripción de riesgos y códigos recogidos en la Ley 31/1995, se procede a seleccionar aquellos aspectos más relevantes y que tienen relación con la instalación bajo este estudio.

- **Código 01:** Caída de personas a distinto nivel

Existen plataformas elevadas en las inmediaciones de los ventiladores encargados de diluir las corrientes a la salida de los hornos.

- **Código 14:** Exposición a temperaturas ambientes extremas

La corriente de contaminantes gaseosos proviene de un horno de cocción, el cual está situado en un mismo recinto de trabajo con los demás trabajadores, ocasionando altas temperaturas en sus proximidades. Las conducciones utilizadas en el sistema de depuración y el filtro de mangas también desprenden un calor considerable.

- **Código 15:** Contactos térmicos

El calor desprendido por los hornos, conducciones y el filtro de mangas se ve reflejado en sus paredes exteriores, el contacto con dichas superficies a altas temperaturas puede ocasionar graves heridas por quemaduras.

- **Código 18:** Contacto con sustancias cáusticas o corrosivas

El conjunto de las sustancias con las cuales se trabaja en la instalación resultan ser contaminantes ácidos y el reactivo empleado para el sistema de depuración es bicarbonato de sodio. Algunos productos pueden llegar a ocasionar heridas al entrar en contacto con estos compuestos.

- Código 24: Exposiciones al ruido

La actividad se llega a cabo en un ambiente ruidoso, en especial el filtro de mangas es un equipo con tendencia a superar los decibelios permisibles de emisión y provocar lesiones auditivas en las personas involucradas.

Al haber analizado los posibles riesgos de la planta, se ha aplicado el método INSHT para evaluar si se necesita la aplicación de medidas correctivas. Los resultados son plasmados en la *Tabla A13.2*.

Tabla A13.2 Aplicación del método INSHT al caso estudiado [7]

Código	Probabilidad	Consecuencia	Tolerancia
01	Poco posible	Serio	Moderado
14	Casi seguro	Importante	Importante
15	Posible	Importante	Moderado
18	Poco posible	Importante	Tolerable
24	Posible	Leve	Tolerable

En base a los resultados obtenidos, es necesario actuar en mayor o menor medida a los códigos descritos anteriormente. Por lo que se refiere a las medidas correctoras tomadas, estas se describen a continuación.

- Código 01: Caída de personas a distinto nivel

Para evitar los posibles accidentes ocasionados por los desniveles de la instalación, se procede al vallado de las plataformas de trabajo y la implementación de escaleras de seguridad para el acceso a dichas zonas.

- Código 14: Exposición a temperaturas ambientes extremas

Para evitar accidentes debidos a exposiciones a altas temperaturas, se instalaría una delimitación mediante líneas de seguridad para que el personal esté alejado de los focos de calor. Estas líneas podrán ser superadas en intervalos determinados de tiempo y en caso de necesidad.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

- Código 15: Contactos térmicos

De forma análoga a la medida correctora del Código 14, se procedería a una debida señalización para aquellos contactos que puedan llegar a ser dañinos.

- Código 18: Contacto con sustancias cáusticas o corrosivas

Para evitar la posible exposición a personas no autorizadas o no conocedoras de la peligrosidad de los compuestos, se procedería a almacenar el reactivo empleado y el posible residuo tóxico.

- Código 24: Exposiciones al ruido

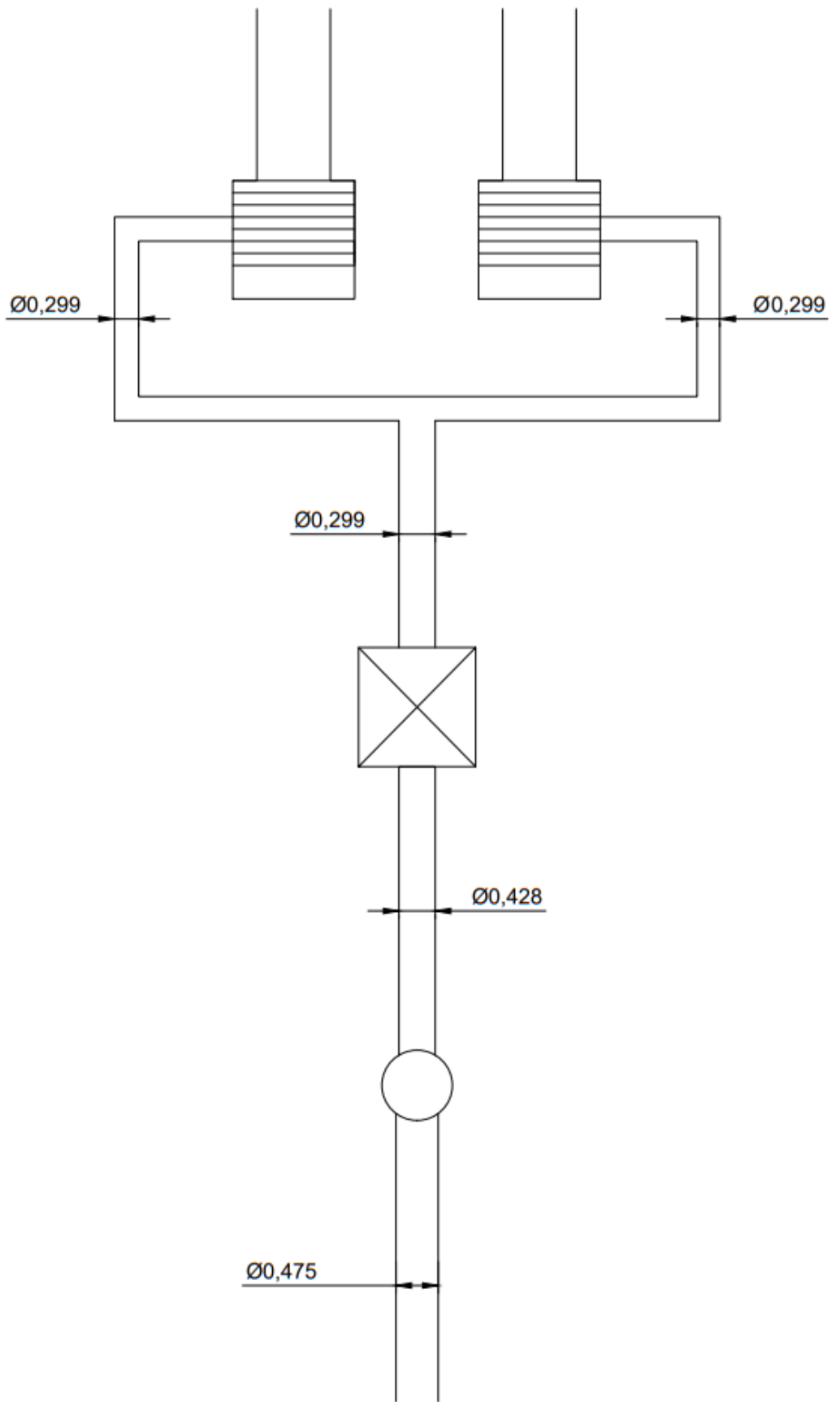
Sería recomendable el uso de cascos de protección de ruidos para el personal que vaya a estar en contacto con el filtro de mangas o que realicen tareas en sus inmediaciones.

Las medidas correctoras descritas supondrían la posibilidad de poder realizar la actividad dentro de la planta sin riesgo para las personas involucradas en los distintos trabajos. Pese a esto, el riesgo es algo intrínseco el cual es posible disminuir, pero nunca eliminar completamente. Es por ello por lo que se deben realizar revisiones y análisis de forma periódica para anticiparse y detectar posibles nuevos riesgos que puedan aparecer.

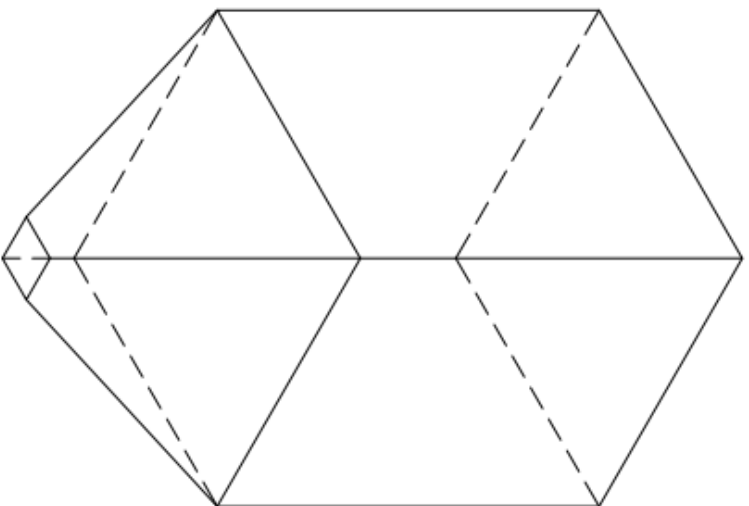
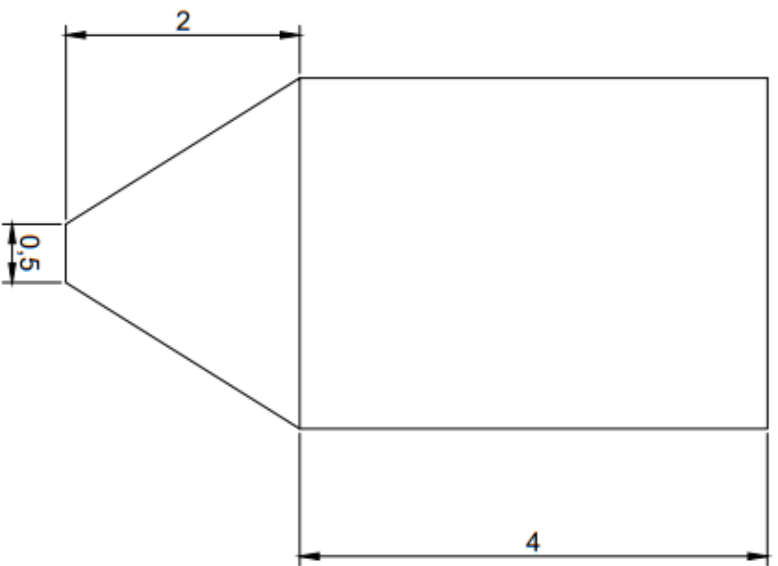
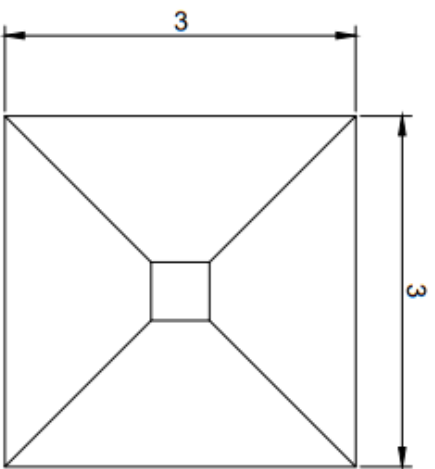
4. PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. PLANO GENERAL DE INSTALACIÓN	1
2. PLANO DE LAS DIMENSIONES DEL FILTRO DE MANGAS	2



	
Nº plano	01
Asignatura	EQ1044
Autor	Alexandru Lucian Rus
Nombre del plano	Plano general de la instalación junto a los diámetros internos de las conducciones.
Escala	1:75
Unidades	m
Fecha	Sep. 2022



	
Nº plano	02
Asignatura	EO1044
Autor	Alexandru Lucian Rus
Nombre del plano	Plano de las dimensiones del filtro de mangas
Escala	1:100
Unidades	m
Fecha	Sep. 2022

5. PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES	1
1.1. DISPOSICIONES GENERALES	1
1.2. CONTRATO DE OBRA	1
2. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA	2
2.1. CORRESPONDIENTE AL PROMOTOR	2
2.2. CORRESPONDIENTES AL PROYECTISTA	3
2.3. CORRESPONDIENTES AL PROMOTOR	4
3. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA	7
4. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL	10
5. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA	11
5.1. CONDCIONES TÉCNICAS GENERALES	11
5.2. CONDCIONES TÉCNICAS PARTICULARES	12

1. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

1.1. DISPOSICIONES GENERALES

El presente Pliego de Condiciones tiene por finalidad regular la ejecución de la obra fijando los niveles técnicos y de calidad exigibles, definiendo las intervenciones que corresponden, según el contrato y de acuerdo a la legislación aplicable, al promotor, al contratista, sus técnicos y encargados, así como las relaciones entre ellos y sus correspondientes obligaciones en concordancia al cumplimiento del contrato de obra.

1.2. CONTRATO DE OBRA

El presente contrato de obra, tiene por objetivo la construcción de un sistema de depuración de contaminantes ácidos en hornos cerámicos. Se recomienda la contratación de la ejecución de las obras por unidades de obra, con arreglo a los documentos del proyecto y en cifras fijas. El Director de Obra ofrecerá la documentación necesaria para su realización.

En el contrato se integran los siguientes documentos relacionados por orden de actuación en caso de contradicción entre las partes.

1. Las condiciones fijadas en el propio documento de contrato de empresa o arrendamiento de obra.
2. Memoria, planos, mediciones y presupuesto.
3. El presente Pliego de Condiciones particulares.
4. El Pliego de Condiciones de la Dirección general de Arquitectura.

2. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE FACULTATIVA

2.1. CORRESPONDIENTE AL PROMOTOR

- Ostentar sobre la propiedad la titularidad de un permiso que le faculte para construir en él. Facilitar la documentación e información previa necesaria para la redacción del proyecto correspondiente, así como autorizar al director de obra, al director de la ejecución de la obra y al contratista posteriores modificaciones del mismo que fueran imprescindibles para llevar a buen fin el proyecto.
- Elegir y contratar a los distintos agentes, con la titulación y capacitación profesional necesaria, que garanticen el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles para realizar en su globalidad y realizar el objeto de lo promovido, en los plazos estipulados y en las condiciones de calidad mínima exigibles mediante el cumplimiento de los requisitos básicos estipulados para las instalaciones.
- Gestionar y hacerse cargo de las preceptivas licencias y demás autorizaciones administrativas procedentes, de conformidad con la normativa aplicable.
- Garantizar los daños materiales que la instalación pueda sufrir, para la adecuada protección de los intereses de los usuarios finales, en las condiciones legalmente establecidas, asumiendo la responsabilidad civil de forma personal e individualizada, tanto por actos propios como por actos de otros agentes por los que, con arreglo a la legislación vigente, se deba responder.
- Contratar a los técnicos redactores del preceptivo estudio de seguridad y salud o estudio básico, en su caso, al igual que a los técnicos coordinadores en la materia en la fase que corresponda, todo ello según lo establecido en el R.D. 1627/97, de 24 de octubre, por el que se establecen las disposiciones mínimas en materia de seguridad y salud en las obras de construcción.
- El Promotor no podrá dar orden de inicio de las obras hasta que el contratista haya redactado su plan de seguridad y, además, este haya sido aprobado por el coordinador en materia de seguridad y salud en fase de ejecución de la obra, dejando constancia expresa en el acta de aprobación realizada al efecto.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

- Efectuar el denominado aviso previo a la autoridad laboral competente, haciendo constar los datos de la obra, redactándolo de acuerdo a lo especificado en el Anexo III del R.D.1627/97. Una copia del mismo deberá exponerse en la obra de forma visible, actualizándolo si fuese necesario.
- Suscribir el acta de recepción final de las obras, una vez concluidas éstas, haciendo constar la aceptación de las obras, que podrá efectuarse con o sin reservas y que deberá abarcar la totalidad de las obras o fases completas. En el caso de hacer mención expresa a reservas para la recepción, deberán mencionarse de manera detallada las deficiencias y se deberá hacer constar el plazo en que deberán quedar subsanados los defectos observados.
- Entregar al adquirente y usuario inicial, en su caso, el manual de uso y mantenimiento del mismo y demás documentación de obra ejecutada, o cualquier otro documento exigible por las administraciones competentes.

2.2. CORRESPONDIENTES AL PROYECTISTA

- Redactar el proyecto por encargo del Promotor, con sujeción a la normativa técnica en vigor y conteniendo la documentación necesaria para tramitar tanto la licencia de obras y demás permisos administrativos como para ser interpretada y poder ejecutar totalmente la obra, entregando al promotor las copias autorizadas correspondientes, debidamente visadas por su colegio profesional.
- Definir el concepto global del proyecto de ejecución con el nivel de detalle gráfico y escrito suficiente y calcular los elementos fundamentales de la instalación.
- Concretar en el proyecto el emplazamiento de cuartos de máquinas, de contadores, hornacinas, espacios asignados para subida de conductos, reservas de huecos de ventilación, alojamiento de sistemas de telecomunicación y, en general, de aquellos elementos necesarios en la instalación para facilitar las determinaciones concretas y especificaciones detalladas que son cometido de los proyectos parciales, debiendo estos adaptarse al proyecto de ejecución, y no pudiendo contravenirlo en modo alguno.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

- Deberá entregarse necesariamente un ejemplar del proyecto complementario al arquitecto antes del inicio de las obras o instalaciones correspondientes.
- Acordar con el promotor la contratación de colaboraciones parciales de otros técnicos profesionales.
- Facilitar la colaboración necesaria para que se produzca la adecuada coordinación con los proyectos parciales exigibles por la legislación o la normativa vigente y que sea necesario incluir para el desarrollo adecuado del proceso, que deberán ser redactados por técnicos competentes, bajo su responsabilidad y suscritos por persona física. Los proyectos parciales serán aquellos redactados por otros técnicos cuya competencia puede ser distinta e incompatible con las competencias del ingeniero y, por tanto, de exclusiva responsabilidad de estos. Elaborar aquellos proyectos parciales o estudios complementarios exigidos por la legislación vigente en los que es legalmente competente para su redacción, excepto declinación expresa del ingeniero y previo acuerdo con el promotor, pudiendo exigir la compensación económica en concepto de cesión de derechos de autor y de la propiedad intelectual si se tuviera que entregar a otros técnicos, igualmente competentes para realizar el trabajo, documentos o planos del proyecto por él redactado, en soporte papel o informático.
- Ostentar la propiedad intelectual de su trabajo, tanto de la documentación escrita como de los cálculos de cualquier tipo, así como de los planos contenidos en la totalidad del proyecto y cualquiera de sus documentos complementarios.

2.3. CORRESPONDIENTES AL PROMOTOR

- Tener la capacitación profesional o titulación que habilita para el cumplimiento de las condiciones legalmente exigibles para actuar como constructor.
- Organizar los trabajos de construcción, redactando los planes de obra que se precisen y proyectando o autorizando las instalaciones provisionales y medios auxiliares de la obra.
- Examinar la documentación aportada por los técnicos redactores correspondientes, tanto del Proyecto de Ejecución como de los proyectos

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

complementarios, así como del Estudio de Seguridad y Salud, verificando que le resulta suficiente para la comprensión de la totalidad de la obra contratada o, en caso contrario, solicitando las aclaraciones pertinentes.

- Elaborar, antes del comienzo de las obras, el plan de seguridad y salud de la obra en aplicación del estudio correspondiente, y disponer, en todo caso, la ejecución de las medidas preventivas, velando por su cumplimiento y por la observancia de la normativa vigente en materia de seguridad e higiene en el trabajo.
- Ostentar la Jefatura de todo el personal que intervenga en la obra y coordinar las intervenciones de los subcontratistas y trabajadores autónomos.
- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales y elementos constructivos que se utilicen, comprobando los preparados en obra y rechazando los suministros o prefabricados que no cuenten con las garantías o documentos de idoneidad requeridos por las normas de aplicación.
- Disponer de los medios materiales y humanos que la naturaleza y entidad de la obra impongan, disponiendo del número adecuado de oficiales, suboficiales y peones que la obra requiera en cada momento, bien por personal propio o mediante subcontratistas al efecto, procediendo a solapar aquellos oficios en la obra que sean compatibles entre sí y que permitan acometer distintos trabajos a la vez sin provocar interferencias, contribuyendo con ello a la agilización y finalización de la obra dentro de los plazos previstos.
- Llevar a cabo la ejecución material de las obras de acuerdo con el proyecto, las normas técnicas de obligado cumplimiento y las reglas de la buena construcción.
- Custodiar el Libro de órdenes y seguimiento de la obra, y dar el enterado a las anotaciones que se practiquen en el mismo.
- Facilitar al Aparejador o Arquitecto Técnico, con antelación suficiente, los materiales precisos para el cumplimiento de su cometido.
- Preparar las certificaciones parciales de obra y la propuesta de liquidación final. Así como suscribir con el Promotor el acta de recepción de la obra.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

- Concertar los seguros de accidentes de trabajo y de daños a terceros durante la obra.
- Suscribir las garantías de obra que se señalan en el Artículo 19 de la Ley de Ordenación de la Edificación y que, en función de su naturaleza, alcanzan períodos de 1 año (daños por defectos de terminación o acabado de las obras), 3 años (daños por defectos o vicios de elementos constructivos o de instalaciones que afecten a la habitabilidad) o 10 años (daños en cimentación o estructura que comprometan directamente la resistencia mecánica y la estabilidad de la instalación).
- El Constructor dará comienzo a las obras en el plazo marcado en el Pliego de Condiciones particulares, desarrollándolas en la forma necesaria para que dentro de los periodos parciales en aquel ejecutados los trabajos correspondientes y, en consecuencia, la ejecución total se lleve a efecto dentro del plazo exigido en el Contrato. Obligatoriamente y por escrito deberá el contratista dar cuenta al Director de Obra del comienzo de los trabajos al menos con tres días de antelación.

3. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE ECONÓMICA

- Se aconseja que se firme el contrato de obra, entre el Promotor y el Contratista, antes de iniciarse las obras, evitando en lo posible la realización de la obra por administración. A la Dirección Facultativa se le facilitará una copia del contrato de obra, para poder certificar los términos pactados. Sólo se aconseja contratar por administración aquellas partidas de obra irrelevantes y de difícil cuantificación, o cuando se desee un acabado muy esmerado. El contrato de obra deberá prever las posibles interpretaciones y discrepancias que pudieran surgir entre las partes, así como garantizar que la Dirección Facultativa pueda, de hecho, COORDINAR, DIRIGIR y CONTROLAR la obra, por lo que es conveniente que se especifiquen y determinen con claridad, como mínimo, los siguientes puntos:
 - Documentos a aportar por el Contratista.
 - Condiciones de ocupación del edificio e inicio de las obras.
 - Determinación de los gastos de enganches y consumos.
 - Responsabilidades y obligaciones del Contratista: Legislación laboral.
 - Responsabilidades y obligaciones del Promotor.
 - Presupuesto del Contratista.
 - Revisión de precios.
 - Forma de pago: Certificaciones.
 - Retenciones en concepto de garantía (nunca menos del 5%).
 - Plazos de ejecución: Planning.
 - Retraso de la obra: Penalizaciones.
 - Recepción de la obra: Provisional y definitiva.
 - Litigio entre las partes.

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

Dado que este Pliego de Condiciones Económicas es complemento del contrato de obra, en caso de que no exista contrato de obra alguno entre las partes se le comunicará a la Dirección Facultativa, que pondrá a disposición de las partes el presente Pliego de Condiciones Económicas que podrá ser usado como base para la redacción del correspondiente contrato de obra.

- Todos los agentes que intervienen en el proceso de la construcción, definidos en la Ley 38/1999 de Ordenación de la Edificación (L.O.E.), tienen derecho a percibir puntualmente las cantidades devengadas por su correcta actuación con arreglo a las condiciones contractualmente establecidas, pudiendo exigirse recíprocamente las garantías suficientes para el cumplimiento diligente de sus obligaciones de pago.
- Si el Contratista, antes de la firma del contrato de obra, no hubiese hecho la reclamación u observación oportuna, no podrá bajo ningún pretexto de error u omisión reclamar aumento de los precios fijados en el cuadro correspondiente del presupuesto que sirva de base para la ejecución de las obras.
- Si el Contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas. el arquitecto-director, en nombre y representación del promotor, los ordenará ejecutar a un tercero, o, podrá realizarlos directamente por administración, abonando su importe con la fianza o garantía, sin perjuicio de las acciones a que tenga derecho el promotor, en el caso de que el importe de la fianza o garantía no bastare para cubrir el importe de los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.
- La indemnización por retraso en la terminación se establecerá en un porcentaje del importe total de los trabajos contratados o cantidad fija, que deberá indicarse en el Contrato suscrito entre Contratista y Promotor, por cada día natural de retraso, contados a partir del día de terminación fijado en el Calendario de obra. Las sumas resultantes se descontarán y retendrán con cargo a la fianza o a la retención.
- El Contratista estará obligado a asegurar la obra contratada durante todo el tiempo que dure su ejecución hasta la recepción definitiva; la cuantía del seguro

Sistema de depuración de contaminantes fluorados en hornos cerámicos

coincidirá en cada momento con el valor que tengan por contrata los objetos asegurados.

- Cuando durante la ejecución de las obras ocupe el contratista, con la necesaria y previa autorización del promotor, edificios o haga uso de materiales o útiles pertenecientes al mismo, tendrá obligación de repararlos y conservarlos para hacer entrega de ellos a la terminación del contrato, en perfecto estado de conservación, reponiendo los que se hubiesen inutilizado, sin derecho a indemnización por esta reposición ni por las mejoras hechas en los edificios, propiedades o materiales que haya utilizado.
- Si el Promotor no efectuase el pago de las obras ejecutadas, dentro del mes siguiente al que se hubiere comprometido, el Contratista tendrá el derecho de percibir la cantidad pactada en el Contrato suscrito con el Promotor, en concepto de intereses de demora, durante el espacio de tiempo del retraso y sobre el importe de la mencionada certificación. Si aún transcurrieran dos meses a partir del término de dicho plazo de un mes sin realizarse dicho pago, tendrá derecho el Contratista a la resolución del contrato, procediéndose a la liquidación correspondiente de las obras ejecutadas y de los materiales acopiados, siempre que éstos reúnan las condiciones preestablecidas y que su cantidad no exceda de la necesaria para la terminación de la obra contratada o adjudicada.

4. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE LEGAL

- El Contratista, con carácter general, está obligado a ejecutar esmeradamente todas las obras que se le asignan, así como a cumplir rigurosamente todas las condiciones estipuladas en este Pliego o en el Contrato.
- De la calidad y buena ejecución de las obras contratadas, el Contratista será el único responsable, no teniendo derecho a indemnizaciones en el caso de mayor precio que pudiese costarle la obra, ni por las erradas maniobras que cometiera durante la construcción, siendo a su cuenta y riesgo independientemente de la inspección que de ellas haya podido haber hecho el Técnico Director de obra.
- La rescisión, si se produjera, se regirá por el Reglamento General de Contratación para Aplicación de la Ley de Contratos de Estado, por el Pliego de Cláusulas Administrativas Generales y demás disposiciones vigentes. Serán causas suficientes de rescisión las siguientes:
 - Muerte o incapacitación del Contratista.
 - Quiebra del Contratista.
 - Alteraciones del contrato por modificación del proyecto, variación en las unidades de obra, incumplimiento de contrato o abandono o suspensión de la obra sin causa justificada.
- La formalización del contrato se verificará por documento privado con el compromiso por ambas partes, Propiedad y Contratista de elevarlo a Documento Público a petición de cualquiera de ellos, como complemento del Contrato, los Planos y demás documentos del Proyecto irán firmados por ambos.

5. PLIEGO DE CONDICIONES DE ÍNDOLE TÉCNICA

5.1. CONDCIONES TÉCNICAS GENERALES

- Los productos, equipos y sistemas suministrados deberán cumplir las condiciones que sobre ellos se especifican en los distintos documentos que componen el Proyecto. Asimismo, sus calidades serán acordes con las distintas normas que sobre ellos estén publicadas y que tendrán un carácter de complementariedad a este apartado del pliego. Tendrán preferencia en cuanto a su aceptabilidad aquellos materiales que estén en posesión de documento de idoneidad técnica que avale sus cualidades, emitido por organismos técnicos reconocidos.
- El contratista será responsable de que los materiales empleados cumplan con las condiciones exigidas, independientemente del nivel de control de calidad que se establezca para la aceptación de los mismos.
- El contratista notificará al director de ejecución de la obra, con suficiente antelación, la procedencia de los materiales que se proponga utilizar, aportando, cuando así lo solicite el director de ejecución de la obra, las muestras y datos necesarios para decidir acerca de su aceptación.
- Estos materiales serán reconocidos por el director de ejecución de la obra antes de su empleo en obra, sin cuya aprobación no podrán ser acopiados en obra ni se podrá proceder a su colocación. Así mismo, aún después de colocados en obra, aquellos materiales que presenten defectos no percibidos en el primer reconocimiento, siempre que vaya en perjuicio del buen acabado de la obra, serán retirados de la obra. Todos los gastos que ello ocasionase serán a cargo del Contratista.
- En los materiales y equipos con garantía propia, se trasladará la garantía que concede el fabricante.

5.2. CONDCIONES TÉCNICAS PARTICULARES

- En la instalación de las conducciones y accesorios de las mismas se utilizará, tal y conforme se especifica en la memoria, acero EN 10255 serie media M (DIN 2440), con diferentes diámetros según el tramo del sistema.
- Así mismo se utilizará el mismo material, acero EN 10255 serie media M (DIN 2440), para la construcción del silo de almacenamiento, la estructura del filtro de mangas y chimenea.
- Los ventiladores instalados en el sistema serán de potencia igual o superior a la indicada en la memoria del proyecto.
- El material de las mangas filtrantes instaladas debe ser Nomex Teflonado. En caso de tener que ser reemplazado se utilizará un material con igual o mayor temperatura de trabajo y con unas condiciones de resistencia similares.
- Los demás materiales que se utilicen en la obra y que se hubiesen dejado de consignar en este Pliego de Condiciones serán de primera calidad y reunirán las condiciones de bondad necesarias a juicio de la Dirección Técnica.

6. ESTADO DE MEDICIONES

ÍNDICE DEL ESTADO DE MEDICIONES

1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE MEDICIONES	1
1.1. EQUIPOS	1
1.2. CONDUCCIONES Y ACCESORIOS	2

1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE MEDICIONES

Dentro del presente estado de mediciones se recolectan las partidas que tienen influencia directa en el presupuesto final del proyecto.

Se encuentran así dos partidas, siendo estas la correspondientes a los equipos y por otro lado, la de las diferentes conducciones y accesorios.

1.1. EQUIPOS

En la *Tabla E1.1* se muestran los diferentes equipos que conforman el sistema de depuración propuestos en el proyecto.

Tabla E1.1 Estado de mediciones de los equipos

Elemento	Unidad	Cantidad
Filtro de mangas (15,5 m ²)	Ud.	1
Mangas de Nomex Teflonado (1,62 m ²)	Ud.	85
Equipo de limpieza de las mangas (5 kW)	Ud.	1
Ventilador centrífugo (2,5 kW)	Ud.	2
Ventilador centrífugo (25 kW)	Ud.	1
Silo de almacenamiento (0,35 m ³)	Ud.	1
Tornillo sin fin (3,5 kW)	Ud.	1
Controlador de presión	Ud.	4
Controlador de temperatura	Ud.	5

1.2. CONDUCCIONES Y ACCESORIOS

En la *Tabla E1.2* se puede apreciar el estado de mediciones referido a las conducciones y accesorios presente en el proyecto.

Tabla E1.2 Presupuesto de partida de las conducciones y los accesorios

Elemento	Unidad	Cantidad
Tubería de acero al carbono Di=0,299 m e=1,7 cm	m	28,0
Tubería de acero al carbono Di=0,428 m e=2,3 cm	m	10,5
Tubería de acero al carbono Di=0,475 m e=2,7 cm	m	7,0
Codo de 90° standard Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	4
Codo de 90° standard Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	2
T standard como división de caudal Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2
T standard como división de caudal Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1
Entrada ligeramente redondeada Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	4
Entrada ligeramente redondeada Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1
Entrada ligeramente redondeada Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1
Salida redondeada Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1
Salida redondeada Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1
Válvula de diafragma abierta Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2
Válvula de seguridad Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2
Válvula de seguridad Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1
Venturi Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1

7. PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DEL MATERIAL	1
1.1. EQUIPOS	1
1.2. CONDUCCIONES Y ACCESORIOS	1
1.3. MANO DE OBRA	3
1.4. RESUMEN DE LA EJECUCIÓN DEL MATERIAL	3
2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	4
3. PRESUPUESTO TOTAL	5

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DEL MATERIAL

Dentro del presupuesto de ejecución del material, se han considerado diferentes apartados según la función de cada uno de estos en el proyecto.

1.1. EQUIPOS

Se engloban en este apartado los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de depuración. Ver *Tabla P1.1*.

Tabla P1.1 Presupuesto de partida de los equipos

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/Ud.)	Precio (€)
Filtro de mangas (15,5 m ²)	Ud.	1	73.939,02	73.939,02
Mangas de Nomex Teflonado (1,62 m ²)	Ud.	85	117,45	9.983,25
Equipo de limpieza de las mangas (5 kW)	Ud.	1	376,82	376,82
Ventilador centrífugo (2,5 kW)	Ud.	2	361,20	722,4
Ventilador centrífugo (25 kW)	Ud.	1	4.163,68	4.163,68
Silo de almacenamiento (0,35 m ³)	Ud.	1	1.600,00	1.600,00
Tornillo sin fin (3,5 kW)	Ud.	1	900,00	900,00
Controlador de presión	Ud.	5	121,75	608,75
Controlador de temperatura	Ud.	4	286,97	1.147,88
Precio de los equipos				93.441,80

1.2. CONDUCCIONES Y ACCESORIOS

Dentro del siguiente apartado se recopilan el conjunto de tramos rectos de las conducciones utilizadas y los accesorios necesarios para la circulación de la corriente a lo largo del sistema de depuración. Todo esto se muestra en la *Tabla P1.2*.

Tabla P1.2 Presupuesto de partida de las conducciones y los accesorios

Elemento	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud.)	Precio (€)
Tubería de acero al carbono Di=0,299 m e=1,7 cm	m	28,0	8,19	229,32
Tubería de acero al carbono Di=0,428 m e=2,3 cm	m	10,5	9,16	96,18
Tubería de acero al carbono Di=0,475 m e=2,7 cm	m	7,0	13,32	93,24
Codo de 90° standard Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	4	16,34	65,36
Codo de 90° standard Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	2	21,82	43,64
T standard como división de caudal Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2	38,28	76,56
T standard como división de caudal Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1	42,66	42,66
Entrada ligeramente redondeada Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	4	3,12	12,48
Entrada ligeramente redondeada Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1	4,07	4,07
Entrada ligeramente redondeada Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1	7,15	7,15
Salida redondeada Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1	14,00	14,00
Salida redondeada Di=0,475 m e=2,7 cm	Ud.	1	16,00	16,00
Válvula de diafragma abierta Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2	169,75	339,50
Válvula de seguridad Di=0,299 m e=1,7 cm	Ud.	2	23,53	47,06
Válvula de seguridad Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1	58,85	58,85
Venturi Di=0,428 m e=2,3 cm	Ud.	1	101,83	101,83
Precio conducciones y accesorios				829,16

1.3. MANO DE OBRA

Según el colegio de ingenieros industriales de la Comunidad Valenciana, se pueden estimar los costes de la mano de obra como el 15 % del precio de los equipos. Esta información se ve reflejada en la *Tabla P1.3*.

Tabla P1.3 Presupuesto de partida mano de obra

Elemento	Precio (€)
Equipos	93.441,80
Mano de obra (15 %)	14.016,27

1.4. RESUMEN DE LA EJECUCIÓN DEL MATERIAL

Sumando las tres partidas anteriores se obtiene el Presupuesto de Ejecución del Material (PEM). Consultar *Tabla P1.4*.

Tabla P1.4 Presupuesto de Ejecución del Material

Elemento	Precio (€)
Equipos	93.441,80
Conducciones y accesorios	829,16
Mano de obra	14.016,27
PEM	108.287,23

2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

La obtención del Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC) se halla considerando los gastos generales, que son un 20 % del PEM e incluyen los gastos debidos a licencias, seguridad y salud y tratamiento y vertido de residuos, y el beneficio industrial, un 6% del PEM. Todo esto se muestra en la *Tabla P2.1*.

Tabla P2.1 Presupuesto de Ejecución por Contrata

Elemento	Precio (€)
PEM	108.287,23
Gastos generales (20 %)	21.657,45
Beneficio industrial (6 %)	6.497,23
PEC	136.441,91

3. PRESUPUESTO TOTAL

El presupuesto total, equivalente a la inversión inicial, se determina aplicándole un 7 % de la dirección y redacción de la obra y un 21 % de IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido) al PEC, esto se puede ver en la *Tabla P3.1*.

Tabla P3.1 Presupuesto total

Elemento	Precio (€)
PEC	136.441,91
Dirección y redacción de la obra (7 %)	9.550,93
IVA (21 %)	28.652,80
Presupuesto total	174.645,64

