



Universitat Jaume I

Escola Superior de Tecnologia i Ciències

Experimentals

Grau en Enginyeria Química

***Sistema de depuración de ácido
fluorhídrico de los gases de combustión
de un horno monoestrato***

Trabajo Fin de Grado

Autor

Fernando Romero Sáez

Tutor

Eliseo Monfort Gimeno

Castellón, Septiembre de 2016

Índice General

0. Resumen
1. Memoria
2. Anexos
3. Planos
4. Pliego de Condiciones
5. Estado de Mediciones
6. Presupuesto

0. Resumen

Dentro del proceso productivo de la fabricación de baldosas cerámicas se encuentra la etapa de cocción. Esta etapa del proceso es un foco emisor de ácido fluorhídrico debido a que a partir de una temperatura de aproximadamente 500°C, el flúor de las arcillas se descompone y, junto al vapor de agua, forma ácido fluorhídrico.

El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de depuración de ácido fluorhídrico de los gases de un horno monoestrato. El sistema consta de un filtro adsorbente de lecho fijo con reactivo por el que se hace pasar a los gases de combustión. Este adsorbente es capaz de retener el ácido fluorhídrico emitido por las arcillas mediante reacción química.

Además, en el proyecto se realizan los cálculos de la instalación de un aislamiento térmico al sistema de depuración por cuestiones de seguridad, correcto funcionamiento y eficiencia energética (aprovechamiento del excedente térmico del gas depurado).

Entre otras cosas, el diseño incluye el cálculo de los pertinentes balances de materia, energía y pérdidas de carga de las conducciones.

Por otro lado, se realiza una comparación (técnica y económica) con la técnica más aceptada y utilizada en la actualidad para la depuración del ácido fluorhídrico, el filtro de mangas con reactivo.

Finalmente, en el presente proyecto se adjuntan los planos del sistema de depuración junto al presupuesto del mismo.



1. Memoria

0. Índice

0.	Índice	2
1.	Antecedentes	4
2.	Justificación	6
3.	Objeto.....	11
4.	Normas y referencias	12
	4.1 Legislación aplicable.....	12
	4.2 Abreviaturas	13
	4.3 Leyenda	14
	4.4 Herramientas y programas de cálculo	14
	4.5 Bibliografía.....	15
5.	Requisitos de diseño	16
	5.1. Sistema previo a la instalación del filtro	16
	5.2.1 Características de los humos de salida.....	16
	5.2 Selección del sistema de depuración.....	18
	5.3. Sistema de depuración con el filtro instalado	19
	5.3.1 Características de los humos de salida.....	20
6.	Análisis de la instalación	21
	6.1. Esquema de la instalación	21
	6.1.1 Previo a la instalación del sistema de depuración.....	21
	6.1.2 Posterior a la instalación del sistema de depuración	22
	6.2 Análisis del filtro adsorbente	24
	6.2.1 Características del adsorbente	25

6.2.2	Distribución del aire en el interior del filtro.....	27
6.3	Características de las conducciones	31
6.3.1	Tramo 1	31
6.3.2	Tramo Filtro	33
6.3.3	Tramo 2	35
6.3.4	Pérdida de carga de las conducciones	36
6.3.5	Potencia del ventilador	37
6.4	Balance de energía térmico del sistema de depuración.....	38
6.4.1	Sistema sin aislamiento térmico.....	38
6.4.2	Sistema con aislamiento térmico.....	44
6.5	Balances de materia al sistema de depuración	47
6.5.1	Duración del adsorbente.....	48
6.5.2	Proceso de sustitución del filtro	49
6.6	Arrancada y parada del filtro.....	50
6.6.1	Arrancada del filtro	50
6.6.2	Parada del filtro	52
6.6.3	Otros problemas	54
7.	Emprendimiento.....	55
8.	Estudio de viabilidad	56
9.	Resumen del presupuesto.....	60

1. Antecedentes

Una asignatura pendiente de la industria cerámica en la zona de la provincia de Castellón es la depuración de ácido fluorhídrico. El porcentaje de industrias que tiene instalado un sistema de depuración de HF es inferior al 10%.

Esta situación ha venido condicionada por la crisis económica. La complicada situación económica llevó a la consejería de medioambiente a llegar a un acuerdo con la industria cerámica para la aplicación de una moratoria de unos 3-4 años en la instalación de sistemas de depuración.

La Directiva 2010/75/UE obliga a las empresas contenidas en el Anexo I a obtener una Autorización Ambiental Integrada (AAI), la cual incluye los valores límites a emisión que deben cumplir (tabla 1-1).

Foco	Contaminante	Límite (mg/Nm³)
Horno	Partículas	30
	NO _x	250
	SO ₂	200
	HF	10

Tabla 1-1. Autorización Ambiental Integrada de la empresa de estudio.

Según el apartado 3 del artículo 31 de la ley 16/2002, de 1 de Julio de prevención y control integrados de la contaminación, se considera sanción grave el incumplimiento de las condiciones establecidas en la AAI, sin que se haya producido un daño o deterior grave para el medio ambiente o sin que se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas. Esta infracción puede acarrear multas desde 20.001 hasta 200.000 euros, además de una posible clausura temporal de las instalaciones.

Sistema de depuración de HF de los gases de combustión de un horno monoestrato

Como la moratoria está a punto de finalizar y la empresa de estudio no cumple con el valor impuesto en la AAI, ha decidido poner solución al problema del HF.

2. Justificación

La emisión de ácido fluorhídrico procede de la cocción de baldosas cerámicas, la cual consta de varias etapas:

1. Dosificación de materias primas y aditivos
2. Preparación de la pasta
3. Prensado
4. Secado
5. Aplicación de esmaltes y decoración
6. Cocción
7. Pulido (opcional)
8. Clasificación, embalaje y envío.

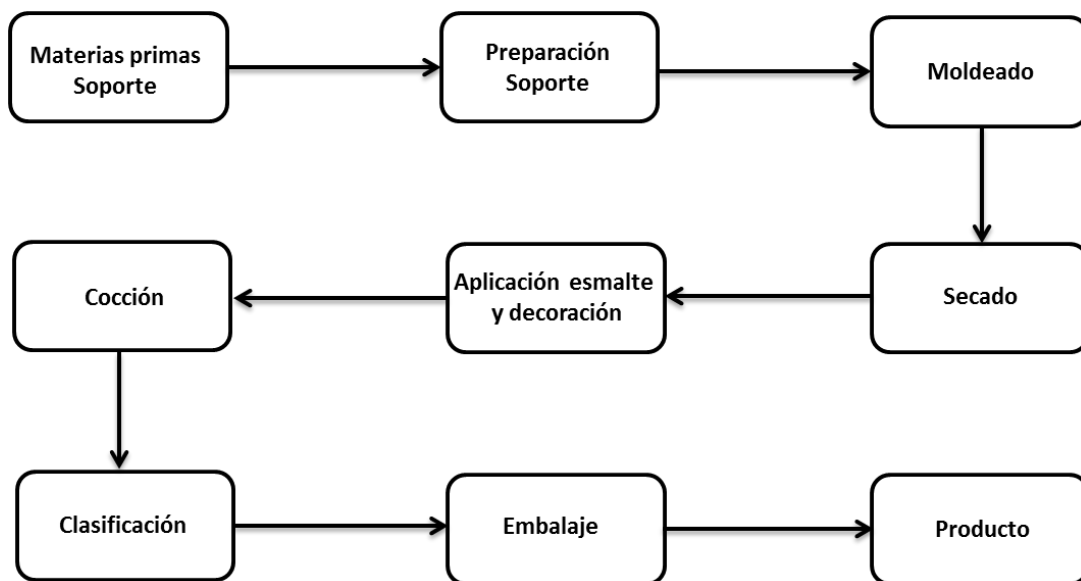


Figura 1-1. Esquema de fabricación de gres porcelánico.

El proceso donde se encuentran las emisiones de ácido fluorhídrico es la cocción de baldosas. En esta etapa, se somete a la pieza a un ciclo térmico, donde ocurren cambios en la microestructura. Se realiza principalmente en hornos monoestrato de rodillos.

Por otro lado, aunque los hornos puedan trabajar a ciclos de monococción o bicocción, el horno del presente trabajo realiza ciclos de monococción.

La forma aproximada de una curva de cocción se encuentra en la figura 1-2:

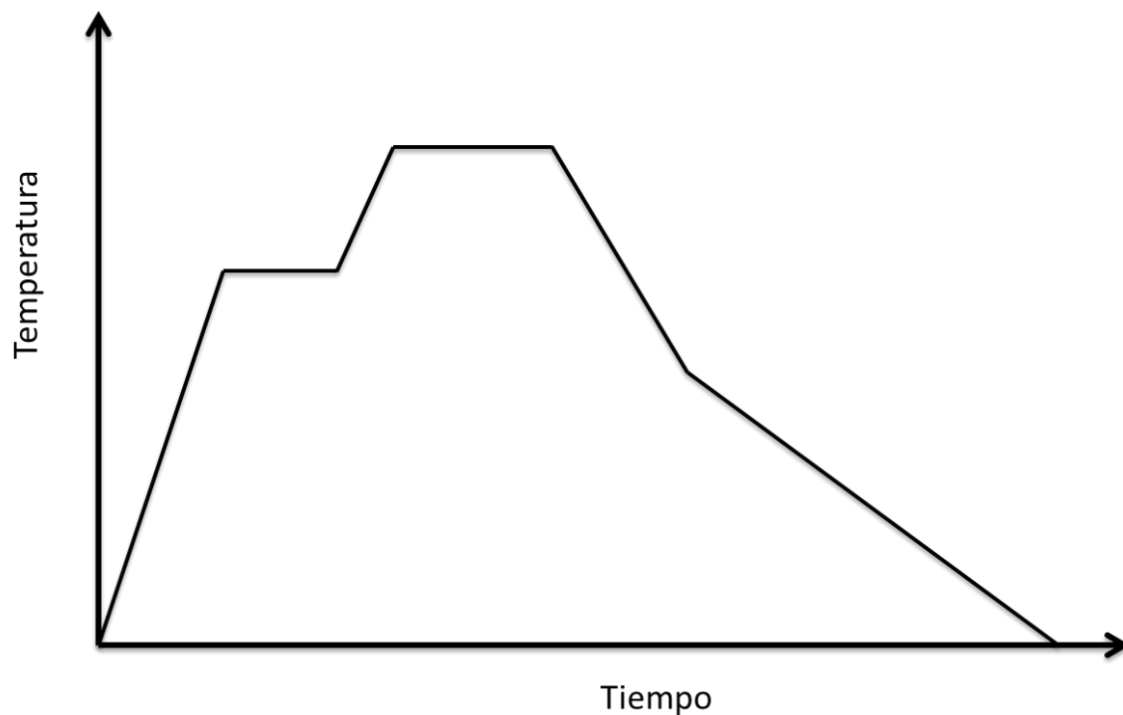


Figura 1-2. Forma de la curva de cocción de un horno. Libro “*Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guía técnica*. Instituto de tecnología cerámica, 1998”

Las transformaciones que tienen lugar en la cocción se muestran en la tabla 1-2:

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 con CaO y FeO con formación de silicatos.
<1200°C	Formación de la fase vítrea con reducción de tamaño y porosidad

Tabla 1-2. Principales transformaciones que tienen lugar durante el ciclo de cocción. Libro “Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guía técnica. Instituto de tecnología cerámica, 1998”

El horno consta de dos focos emisores:

- Chimenea de humos: Se eliminan los gases de la zona de calentamiento, es decir, gases de combustión y gases procedentes de las descomposiciones químicas de las piezas.
- Chimenea de enfriamiento: Eliminación de aire caliente procedente del enfriamiento de las piezas. Este aire caliente se recupera en los secaderos.

La principal fuente de contaminantes de la etapa de cocción es la chimenea de humos. En la tabla 1-3 se observan las sustancias que puede contener, junto con su intervalo de concentraciones:

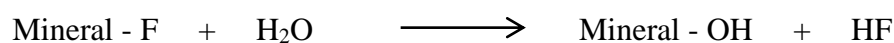
Sustancia	Unidades	Intervalo de concentraciones
Polvo	mg/Nm ³	5-50
Flúor	mg/Nm ³	10-50
Boro	mg/Nm ³	<0.5
Cloro	mg/Nm ³	20-150
Plomo	mg/Nm ³	<0.15
NO _x	pmm	15-60
SO ₂	mg/Nm ³	20-200
CO	pmm	20-100
CO ₂	%	1-4
O ₂	%	15-18

Tabla 1-3. Concentración de las sustancias en la chimenea de humos (Libro “*Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guía técnica.* Instituto de tecnología cerámica, 1998”)

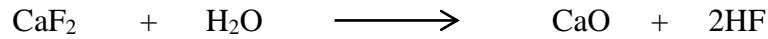
De la tabla 1-3 se puede extraer que el intervalo de concentración del flúor en la chimenea de humos de un horno oscila entre 10 y 50 mg/Nm³.

Las reacciones que tienen lugar para la formación de ácido fluorhídrico son:

1. El flúor procedente de minerales micáceos (moscovita e illita, principalmente) y de caoliníticos (procedente de las arcillas) reacciona con el vapor de agua existente en la atmosfera del horno (procedente de las piezas y de la combustión) formando ácido fluorhídrico y grupos OH. Esta reacción se produce a partir de los 500°C-700°C, dependiendo del tipo de mineral.

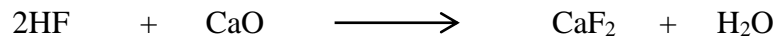


2. La descomposición del fluoruro de calcio (CaF_2), a temperaturas superiores a 900°C , junto al vapor de agua produce HF.



Por otro lado, existe un mecanismo de reabsorción del HF en las piezas. Esta reabsorción se produce a temperaturas bajas de la zona de cocción (precalentamiento). Para que este mecanismo funcione es necesaria la presencia de piedra caliza o cal.

La reacción de reabsorción es la siguiente:



Existen métodos para minimizar el contenido de HF emitido:

- Un precalentamiento lento (reabsorción de HF) y una cocción rápida (menos tiempo de reacción con el vapor de agua) puede producir una reducción importante de HF.
- Una disminución del vapor de agua en el interior del horno mediante calentamiento indirecto (hornos eléctricos o tubos radiantes).
 - Los hornos eléctricos supondrían un amplio rediseño y un consumo alto de energía.
 - En cuanto a los tubos radiantes, es una tecnología emergente que ya se encuentra instalada con éxito en gran parte de industrias. La combustión se produce en el interior del tubo transmitiendo el calor producido al interior del horno mediante el mecanismo de radiación. Se fabrican de carburo de silicio debido a su alta conductividad térmica.

3. Objeto

El método más aceptado para la depuración de HF es la instalación de un filtro de mangas con reactivo, permitiendo así la separación de las partículas de un fluido mediante el paso a través de un lecho poroso, que las retiene.

Se basan de una estructura metálica cerrada en cuyo interior se dispone de elementos filtrantes textiles en posición vertical. La parte inferior de esta cámara consta de una tolva que recoge las partículas. Los gases de combustión se hacen pasar a través del elemento filtrante en el cual se forma una capa de polvo. Una vez el elemento filtrante se sature, se debe realizar una limpieza del sistema.

Sin embargo, la empresa de estudio ha apostado por un sistema de depuración que consta de un filtro de adsorción con reactivo. Este filtro se encuentra en fase de pruebas, es por ello que es la única empresa dentro del sector cerámico español que cuenta con un filtro de este estilo.

El objeto del proyecto es el diseño de un sistema de depuración de ácido fluorhídrico de los gases de un horno cerámico. Este adsorbente es capaz de retener el ácido fluorhídrico formado en el interior del horno.

4. Normas y referencias

4.1 Legislación aplicable

Las normas y referencias utilizadas en este proyecto son las siguientes:

- Ley 16/2002, de 1 de Julio de prevención y control integrados de la contaminación
- Decreto 162/1990 de 15 de Octubre, Reglamento que desarrolla la Ley 2/1989, de 3 de Marzo, de impacto ambiental.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmosfera.
- Real decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establece las disposiciones básicas para su aplicación.
- Resolución de 29 de diciembre de 2006, por la que se otorga a la empresa de estudio la autorización ambiental integrada para la fabricación de arcilla atomizada y azulejos en el término municipal de l'Alcora (Castellón).
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.

4.2 Abreviaturas

- INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.
- D_e : Diámetro externo
- D_i : Diámetro interno
- D_p : Depresión
- r_e : Radio externo
- r_i : Radio interno
- ρ_r : Densidad relativa
- Re: Número de Reynolds
- ϵ : Rugosidad Relativa
- ϵ : Emisividad
- O.C.A: Organismo de Control Autorizado
- e: Espesor
- P: Coste de energía eléctrica
- L: Longitud.
- Q: Caudal
- CR: Condiciones reales
- CN: Condiciones normales
- HF: Ácido fluorhídrico
- ΔP : Caída de presión
- nm: Nanómetros
- Nm^3 : Normal metro cúbico
- PEM: Presupuesto de ejecución de material
- PEC_p : Presupuesto de ejecución por contrata parcial
- PEC: Presupuesto de ejecución por contrata

4.3 Leyenda

La leyenda de las figuras utilizadas en el presente proyecto se encuentra en la figura 1-3:

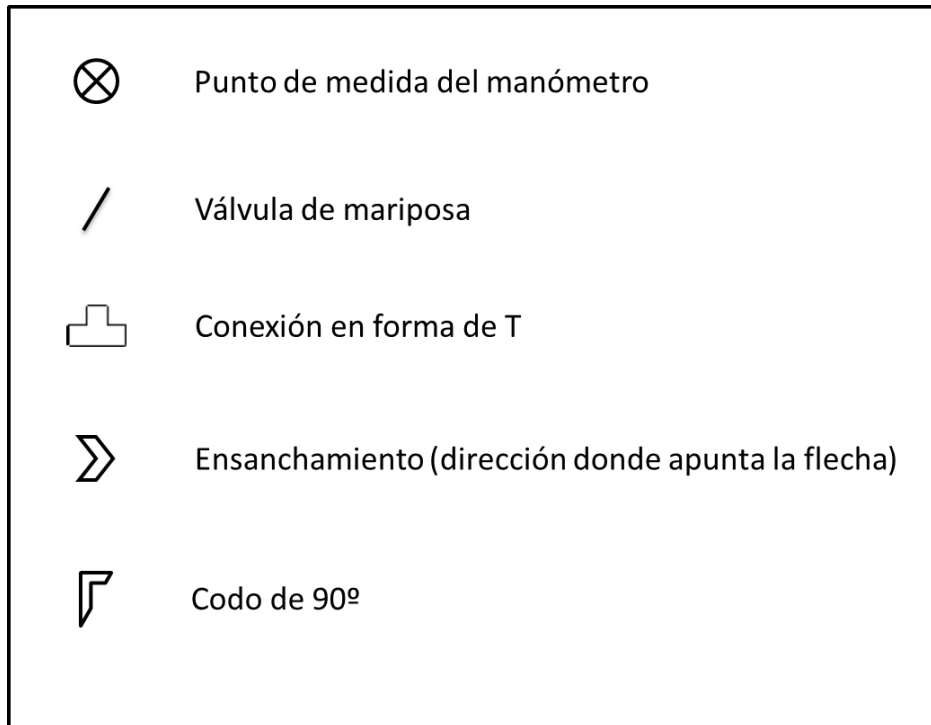


Figura 1-3. Leyenda de las figuras utilizadas.

4.4 Herramientas y programas de cálculo

Las herramientas y programas utilizados en el presente proyecto son los siguientes:

Redacción y cálculos:

- Paquete Office

Planos:

- DraftSight 2016
- Autocad 2014

Procesado de imágenes térmicas:

- FLIR QuickReport

4.5 Bibliografía

- I. LEZAUN NAVARRO, FCO. JAVIER II. BUSANI, GRAZIANO III. MONFORT GIMENO, ELISEO IV. MALLOL GASCH, GUSTAVO. *Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guía técnica*. Instituto de Tecnología Cerámica, 1998
- RODRIGO CARBONELL, M^a DOLORES. *Operaciones básicas de flujo de fluidos*. Publicaciones de la Universitat Jaume I, 2003.
- MONFORT GIMENO, ELISEO. *EQ1027 Tecnología del medio ambiente*. Publicaciones de la Universitat Jaume I, 2013.
- MONFORT GIMENO, ELISEO. *Seguridad e Higiene en la industria química. N38 Ingeniería química*. Publicaciones de la Universitat Jaume I, 2007.
- MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. *Documento BREF. Mejores técnicas disponibles de referencia europea. Sector de la fabricación cerámica, 2011*.
- E. MONFORT, I. CELADES, R. MOLINER, P. AVILA, S. B. RASMUSSEN, P. COSTA, J.V. BONO , F. GASCÓN. *Desarrollo de adsorbentes para la depuración de contaminantes gaseosos ácidos en lecho fijo*. QUALICER 2012.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. *Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones aparatos y equipos*.
- GRUPO AMELSA. Catálogo Técnico, 2015
- COLOMER MENDOZA, FRANCISCO. *Apuntes EQ 1031. Proyectos de Ingeniería*. Universitat Jaume I.
- www.insht.es

5 Requisitos de diseño

El proyecto está basado en la instalación de un filtro de adsorción con un adsorbente capaz de retener el ácido fluorhídrico de los gases de combustión de un horno cerámico. Este horno está situado en una empresa productora de tierra atomizada y de baldosas cerámicas.

Para la instalación de este filtro es necesaria la instalación de unas conducciones adicionales para hacer pasar los gases de combustión a través de este filtro.

5.1. Sistema previo a la instalación del filtro

El diagrama de flujo previo a la instalación del filtro se encuentra en la figura 1-4:

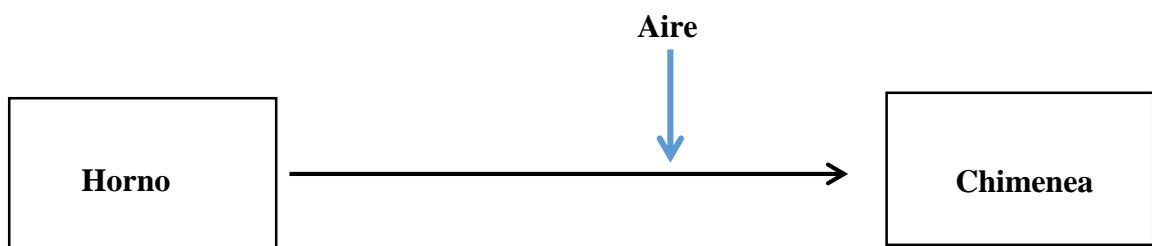


Figura 1-4. Diagrama de flujo previo al filtro

5.2.1 Características de los humos de salida

Sin el filtro instalado es necesaria una dilución para que los gases calientes no dañen el ventilador (soporta temperaturas máximas de 250°C).

Las características de la chimenea son:

- Horno SACMI Tipo: KMS 2400/104,1 N° Serie : 113103
- Material de la chimenea: Metálico
- Tipo de chimenea: Circular

- Combustible : Gas natural
- Distancia L1 : 10 m
- Distancia L2: 2 m
- Diámetro interior chimenea : 0.8 m
- Medida correctora: Filtro adsorbente

Se han obtenido las características de los humos procedentes del horno gracias a las mediciones realizadas por AUDEMA. La medición se ha realizado el día 12 de Mayo del 2015.

Las condiciones de operación del horno a la hora de realizar la medición sin el filtro instalado son:

- Cocción de piezas Hexagonal AIN 40 x40
- Producción: 160 m²/h

Variables	Unidades	1	2	3	Valor medio
P	kPa	98,83	98,85	98,85	98,85
T	°C	205	205	206	205
Humedad	kg H ₂ O /Nm ³	0,0439	0,0439	0,0439	0,0439
O ₂	%	15,8	15,9	15,9	15,9
Q _{seco}	Nm ³ /h	11.153,4	11.186,9	11.179,6	11.173,3
Q _{seco} *(18% O ₂)	Nm ³ /h	19.332,6	19.017,7	19.005,3	19.118,5
HF(18% O ₂)	mg/Nm ³	38,9	38,6	43,1	40,2

Tabla 1-4. Muestreo de gases de combustión sin filtro

Sin embargo, la concentración media de emisión de HF al año es bastante inferior. Esto es debido a que la emisión de HF es variable dependiendo del tipo de material cocido en el horno (tabla 1-5).

	Porcelánico	Gres
HF (mg/Nm³)	35-40	15-25
HF_{medio} (mg/Nm³)	37	20
Producción (%)	25	75

Tabla 1-5. Emisión de HF y producción.

Teniendo en cuenta los factores expuestos se toma como concentración media anual de emisión de fluorhídrico, 25 mg/Nm³.

Comparando el valor de ácido fluorhídrico en la entrada con el valor límite de emisión proporcionado por la autorización ambiental integrada de la empresa (10 mg/Nm³), se puede afirmar que no se cumple con el valor legal de emisión de HF.

5.2 Selección del sistema de depuración

Debido al no cumplimiento de la legislación es necesaria la instalación de un sistema de depuración.

El filtro de mangas es un equipo con alto porcentaje de eficacia de depuración, por ello es el más utilizado en la actualidad para la depuración de HF. Sin embargo, se ha decidido instalar un sistema de depuración de adsorción de lecho fijo con reactivo.

Las ventajas del filtro de mangas respecto al sistema de depuración de lecho fijo con reactivo son:

- Es una tecnología muy conocida en el sector cerámico.
- Existe una oferta más amplia de proveedores de filtros de mangas.
- Es una alternativa más económica a concentraciones altas.

Sin embargo, existen factores en contra:

- El filtro de adsorción presenta menor complejidad mecánica (sin partes móviles).

- El filtro de mangas presenta una mayor pérdida de carga que el filtro de adsorción, lo que equivale a mayor gasto energético del ventilador. Además, necesita de aire comprimido para realizar la limpieza de las mangas.
- En el filtro de mangas el reactivo debe de estar micronizado para que, al entrar en contacto con la corriente, obtenga un buen rendimiento. El reactivo del filtro de adsorción se encuentra granulado (evita obstrucción en carga y descarga).
- El filtro de adsorción tiene unas necesidades de espacio mucho menores que el filtro de mangas. Además, el tiempo necesario para su instalación es mucho menor.
- Con el filtro de adsorción, todas las gestiones relacionadas con el sistema de depuración (gestión de residuos, técnica y logística) la realiza la empresa instaladora del sistema de depuración.

5.3. Sistema de depuración con el filtro instalado

El diagrama de flujo del sistema de depuración con lecho fijo es el siguiente (figura 1-5):

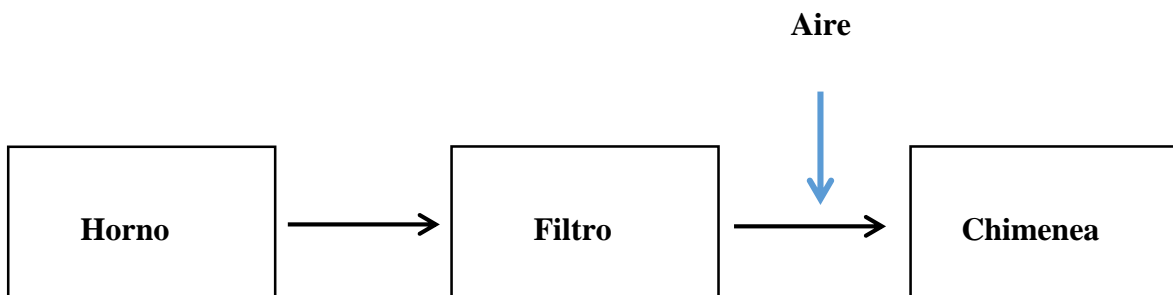


Figura 1-5. Diagrama de flujo posterior al filtro sin aislar

Este sistema de depuración consta de un filtro de lecho fijo de adsorción con reactivo, el cual se instala a un lado del horno cerámico, dentro de la planta de pavimento.

5.3.1 Características de los humos de salida

Las características de los humos después de la instalación del sistema de depuración están realizadas bajo las mismas condiciones que en la tabla 1-6:

Variabes	Unidades	1	2	3	Valor medio
P	kPa	98,79	98,82	98,83	98,81
T	°C	188	193	191	191
Humedad	Kg/Nm ³	0,0439	0,0439	0,0439	0,0439
O ₂	%	14,9	14,8	14,9	14,9
Q _{seco}	Nm ³ /h	8.955,9	9.013,9	9.174,3	9.048,0
Q _{seco} *(18% O ₂)	Nm ³ /h	18.210,3	18.628,7	18.654,4	18.497,8
HF (18% O ₂)	mg/Nm ³	4,2	5,7	6,1	5,3

Tabla 1-6. Medición de los gases de combustión con el filtro instalado

La medición de la tabla 1-6 se ha realizado sin un aislamiento del sistema de depuración, es decir, sin dilución.

Se ha tomado como caudal medio del sistema 9.500 Nm³/h (15% O₂).

6 Análisis de la instalación

6.1. Esquema de la instalación

6.1.1 Previo a la instalación del sistema de depuración

El esquema de la salida de humos del horno previo a la instalación del filtro es el siguiente (figura 1-6):

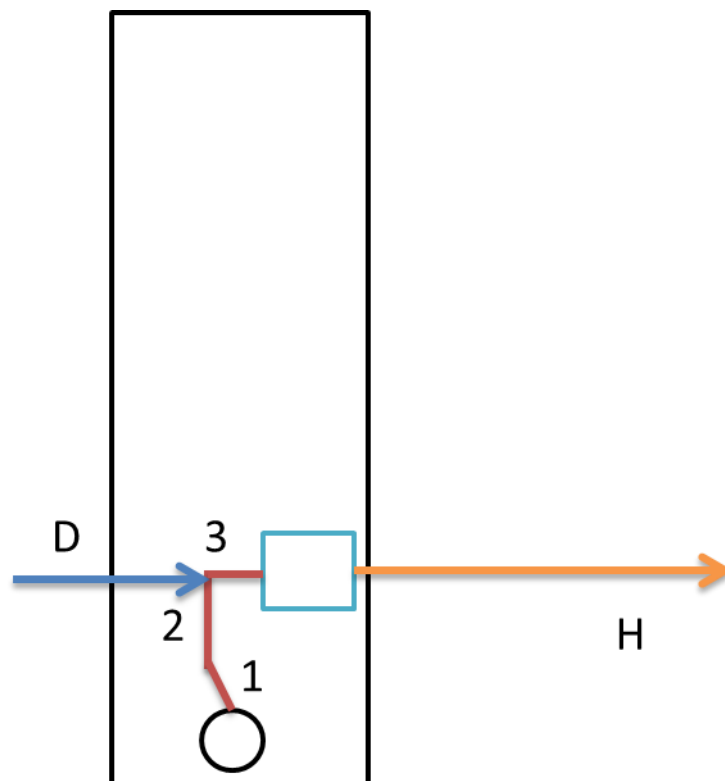


Figura 1-6. Esquema previo a la instalación del sistema de depuración.

6.1.2 Posterior a la instalación del sistema de depuración

La instalación del sistema de depuración de HF ha supuesto una modificación en la salida de humos del horno. El esquema de esta modificación se encuentra en la figura 1-7:

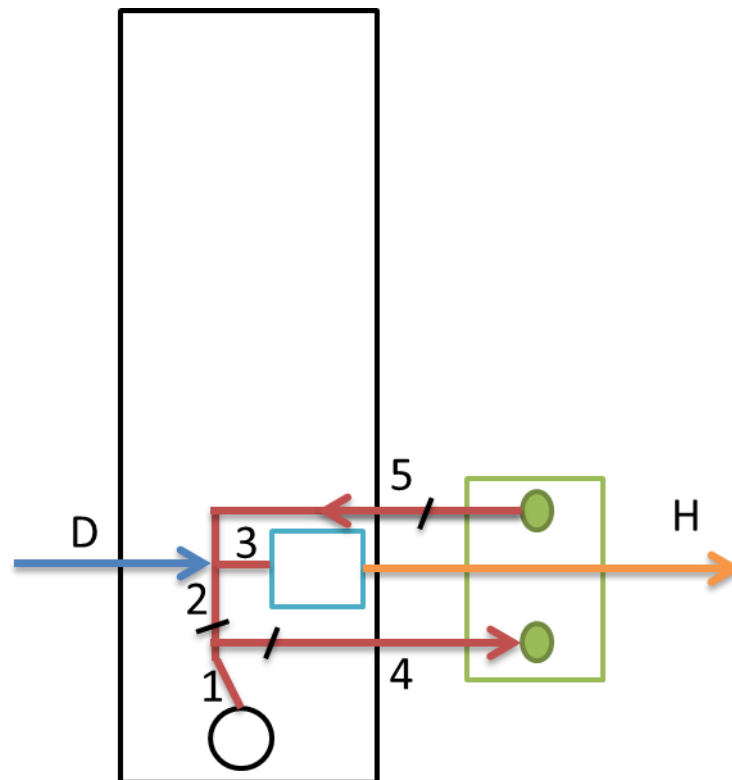


Figura 1-7. Esquema de la instalación con el sistema de depuración instalado.

Los tramos y las corrientes de la figura 1-7 están recogidos en la tabla 1-7:

Tramo/Corriente	Descripción
1	Tramo desde la aspiración hasta la bifurcación
2	Tramo desde la bifurcación hasta el ventilador
3	Tramo desde el aire de dilución hasta el ventilador
4	Tramo desde la bifurcación hasta el filtro
5	Tramo que conecta el filtro con el aire de dilución
D	Corriente de dilución
H	Humos expulsados por la chimenea

Tabla 1-7. Tramos y corrientes del esquema.

Además, a cada válvula se le asigna el subíndice correspondiente al tramo en el que se encuentra.

Los datos de estas corrientes se recogen en la tabla 1-8:

Tramo/Corriente	L(m)	Q_{CN}(Nm³/h)
1	2,3	-
2	3,0	-
3	1,5	-
4	4,5	-
5	6,5	-
D	-	2.654
H	-	9.500

Tabla 1-8. Características de los tramos y corrientes del esquema

6.2 Análisis del filtro adsorbente

El adsorbente del sistema de depuración se encuentra distribuido en el interior de un módulo metálico (figura 1-8):

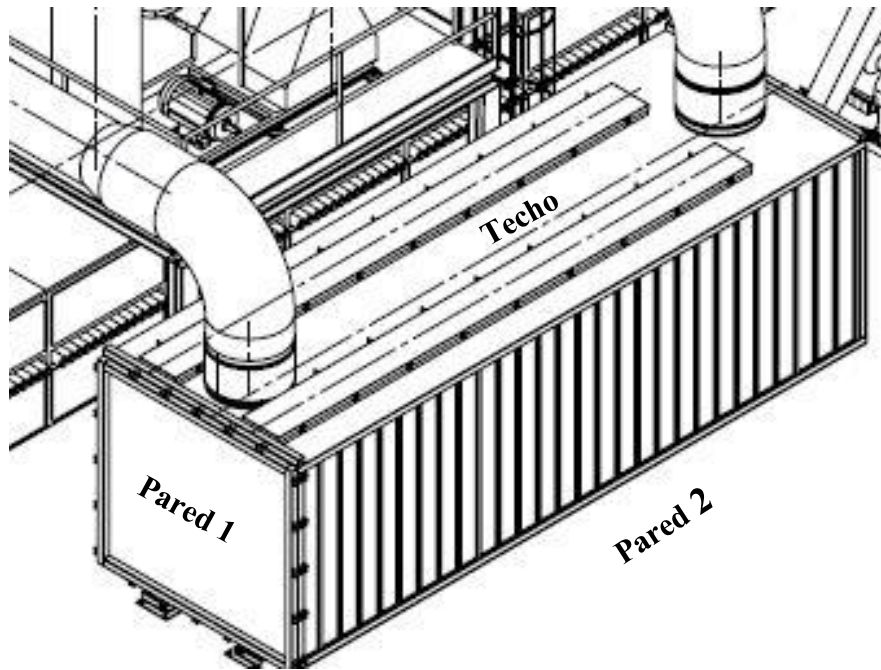


Figura 1-8. Filtro adsorbente.

Las dimensiones de este módulo se encuentran en la tabla 1-9:

	Largo (m)	Alto (m)	Ancho (m)
Módulo	7,16	2,20	2,42
Pared 1	-	2,20	2,42
Pared 2	7,16	2,20	-
Pared 3	-	2,20	2,42
Pared 4	7,16	2,20	-
Techo	7,16	-	2,42
Suelo	7,16	-	2,42

Tabla 1-9. Dimensiones del filtro adsorbente.

Siendo:

- Pared 1 y 2: Marcadas en la figura 1-8.
- Pared 3 y 4: Paredes opuestas a las paredes 1 y 2, respectivamente.
- Techo y Suelo: Techo y suelo del filtro.

6.2.1 Características del adsorbente

La adsorción es el fenómeno por el cual las moléculas del gas se adhieren a la superficie de un compuesto sólido.

Existen dos agentes que actúan en la adsorción:

- Adsorbente: Compuesto sólido que retiene el contaminante. Tiene una alta afinidad con la sustancia a retener.
- Adsorbato: Contaminante retenido.

En la adsorción existen dos formas de que el adsorbente se ponga en contacto con el contaminante:

- Fisorción: Se une al adsorbente mediante fuerzas de Van der Waals.
- Quimisorción: El adsorbato se une al adsorbente mediante enlaces químicos.

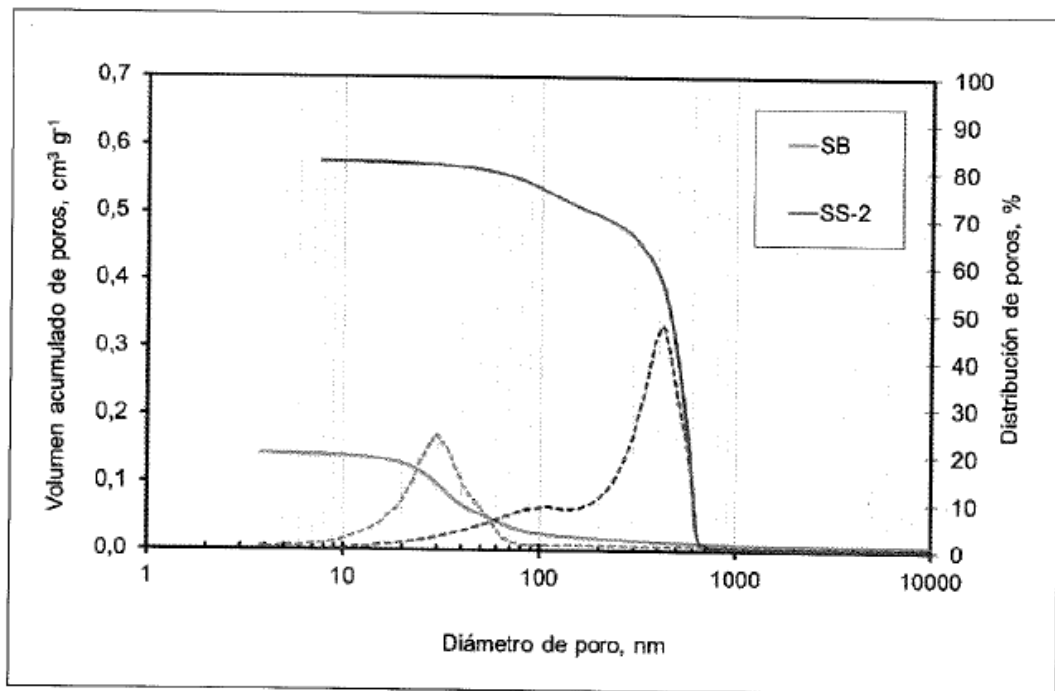
Este filtro contiene diez toneladas de un adsorbente en forma de cilindros huecos (imagen 1-2). El adsorbente es capaz de retener el ácido fluorhídrico de la corriente gaseosa gracias a la gran superficie de contacto que posee y a la unión mediante enlaces químicos del adsorbato (quimisorción).



Imagen 1-1. Adsorbente en el interior del filtro.

Como se observa en la gráfica 1-1, el mayor diámetro de poro del adsorbente convencional (SB) es de aproximadamente 30 nm (esta dimensión es el 25% de los poros del reactivo). Sin embargo, en el adsorbente utilizado en el sistema de depuración del presente proyecto (SS-2), el mayor diámetro de poro es aproximadamente 500 nm (esta dimensión es el 50% de los poros del reactivo).

Es decir, este adsorbente dispone de una gran área de contacto con el contaminante debido a su alto volumen de poro de gran diámetro. Este volumen de poro es muy superior a la de los adsorbentes convencionales, disminuyendo así las limitaciones de difusión del contaminante en el adsorbente.



Gráfica 1-1. Distribución de los poros del adsorbente utilizado respecto a uno convencional. Artículo “Desarrollo de adsorbentes para la depuración de contaminantes gaseosos ácidos en lecho fijo”

Además, la colocación de dos paneles perforados con pequeños agujeros produce que la corriente se distribuya de forma transversal a través del filtro, aumentando además del área de contacto, el tiempo de reacción.

El adsorbente no se encuentra en la totalidad del interior del filtro, sino que se encuentra distribuido entre mallas de acero con orificios para permitir el paso del humo.

6.2.2 Distribución del aire en el interior del filtro

La homogeneidad de la distribución del humo en el interior del filtro es un factor que actúa sobre el rendimiento del filtro. Si el humo no se distribuye de forma homogénea, el adsorbente reacciona más en unas zonas del lecho que en otras, produciendo así una pérdida de rendimiento y un desaprovechamiento de parte del lecho.

La distribución de aire desde una perspectiva superior se observa en la figura 1-9. Desde esta perspectiva se observa que es probable que el humo desgaste antes el adsorbente más cercano a la entrada de humos, que el más cercano a la salida de humos.

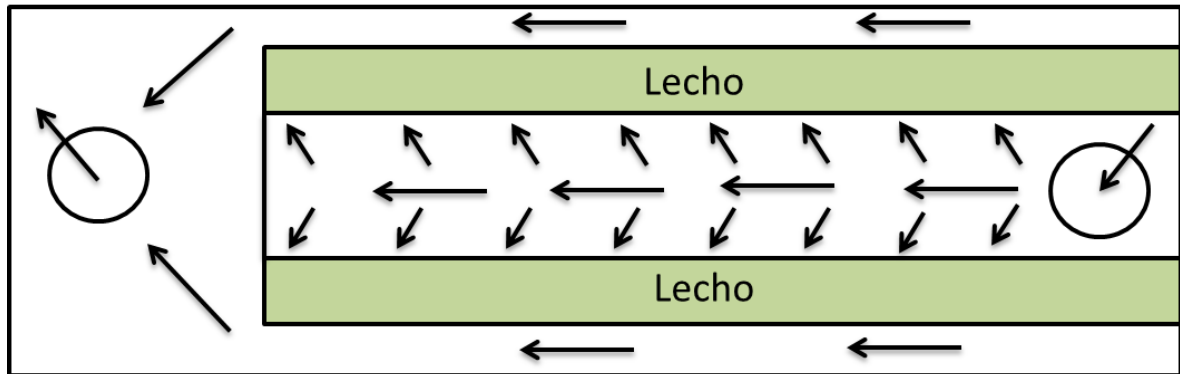


Figura 1-9. Interior del filtro adsorbente (vista superior).

Por otro lado, desde una perspectiva frontal se observa en la figura 1-10, que la mayoría del calor de los humos se encuentra a una altura media, es decir, el humo no está distribuido homogéneamente. Esto produce que el adsorbente de la parte inferior y superior no se desgaste al mismo ritmo que el situado a una altura media.

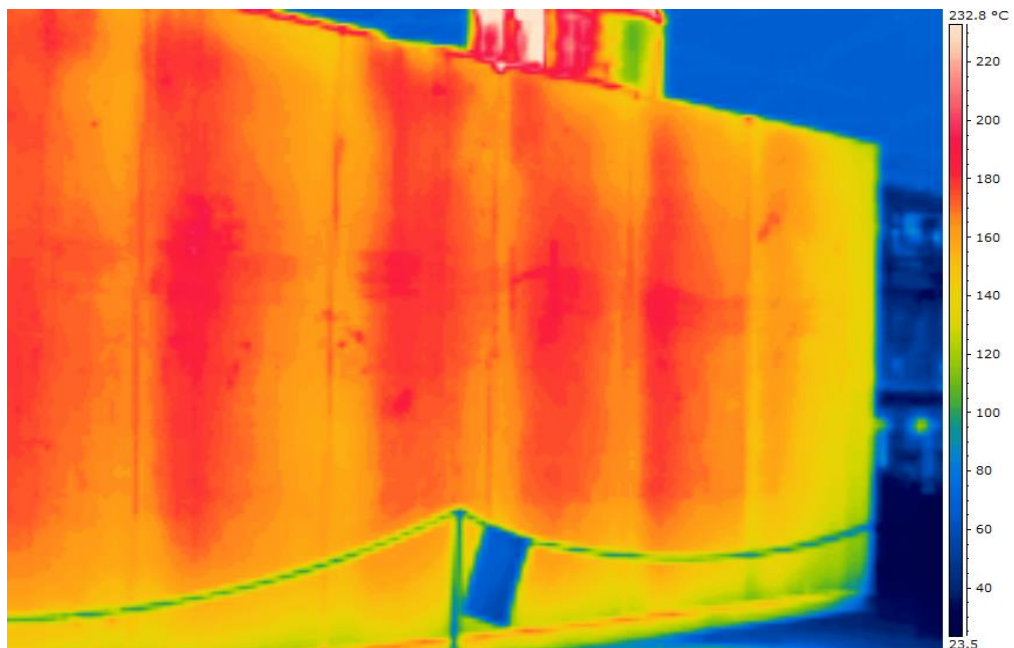


Figura 1-10. Temperaturas de pared del filtro. (Vista frontal).

Así pues, la distribución más probable del aire en el interior del filtro desde una vista frontal se encuentra en la figura 1-11:

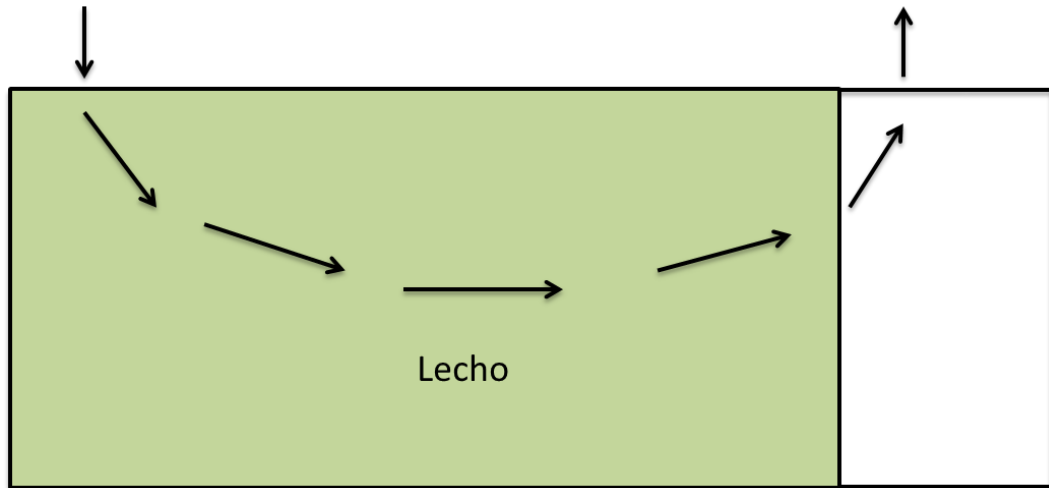


Figura 1-11. Distribución del aire en el filtro (Vista frontal).

6.2.2.1 Mejora de la distribución del aire en el interior del filtro

Como la distribución de humos dentro del filtro no es homogénea, sería conveniente realizar modificaciones en el diseño del filtro original. Una de estas modificaciones podría ser la introducción de los humos por la parte inferior del filtro. En la parte inferior central del filtro el diámetro de la conducción por donde circulan los gases de combustión debe de ser más estrecho que en los extremos, así los humos aprovecharían el adsorbente en dirección transversal. Además, como se introduciría por la parte inferior, el humo tendería a subir aprovechando de la misma forma el adsorbente de la parte inferior y de la superior (figura 1-12).

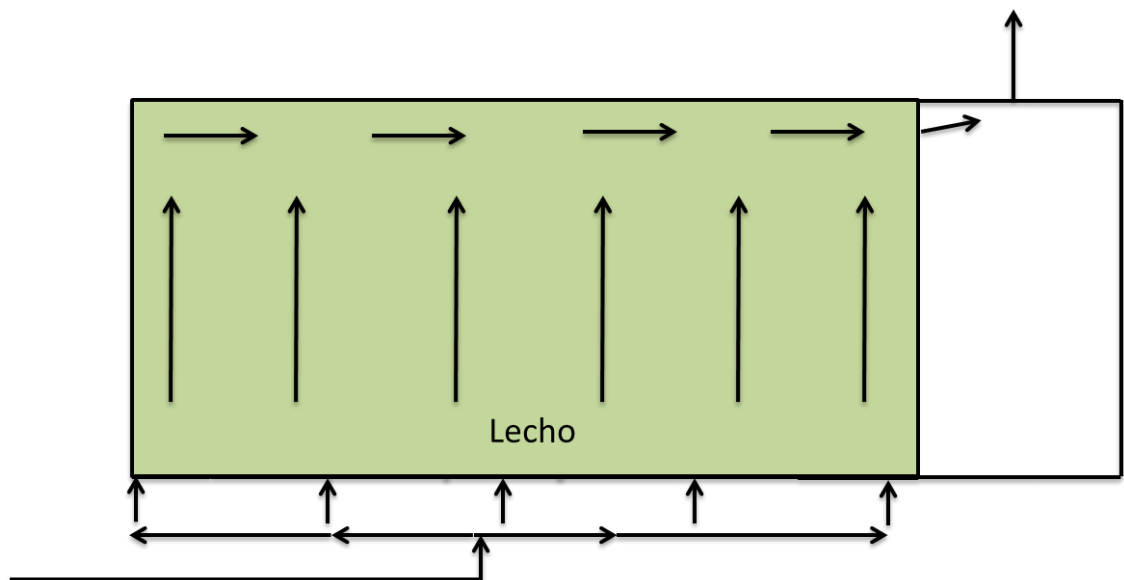


Figura 1-12. Posible mejora de distribución de aire en el filtro.

6.3 Características de las conducciones

Las conducciones utilizadas en el sistema de depuración de ácido fluorhídrico se encuentran en la tabla 1-10:

Material	D_e (m)	D_i (m)	e (m)	L(m)
Acero M S 195 T	0,603	0,531	0,036	16,7
Acero M S 195 T	0,424	0,360	0,032	0,6

Tabla 1-10. Características de las conducciones.

Siendo:

- D_e: Diámetro exterior (m)
- D_i: Diámetro interior (m)
- e: Espesor (m)

El sistema de depuración se ha dividido en dos tramos:

- Tramo 1: Desde la aspiración hasta el filtro.
- Tramo Filtro: Filtro de adsorción
- Tramo 2: Desde la salida del filtro hasta el ventilador.

6.3.1 Tramo 1

En el tramo 1 se aspiran los gases de combustión del horno por la parte superior e inferior y se llevan hasta el filtro.

Como en este tramo existe un cambio de altura, son necesarias dos vistas para entender su posicionamiento (figuras 1-13 y 1-14):

- Vista desde la parte frontal del horno:

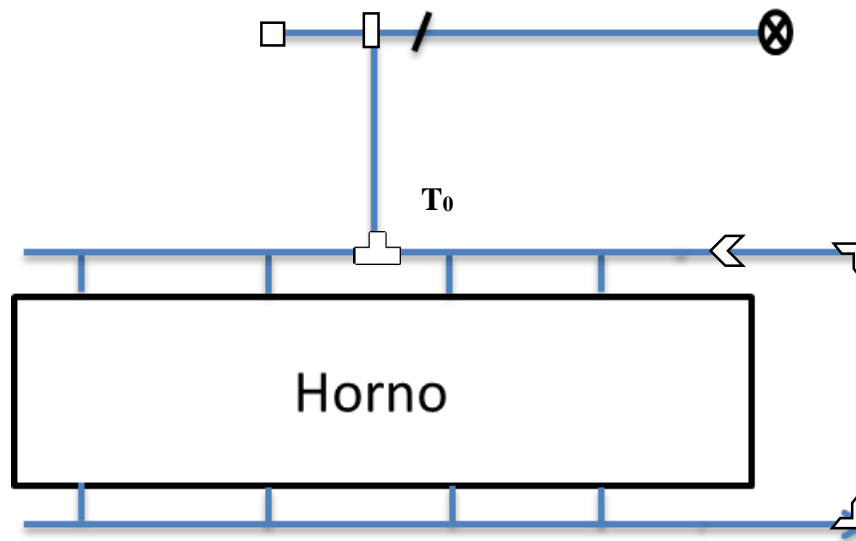


Figura 1-13. Tramo 1 (vista desde entrada horno).

- Vista desde la parte superior del horno:

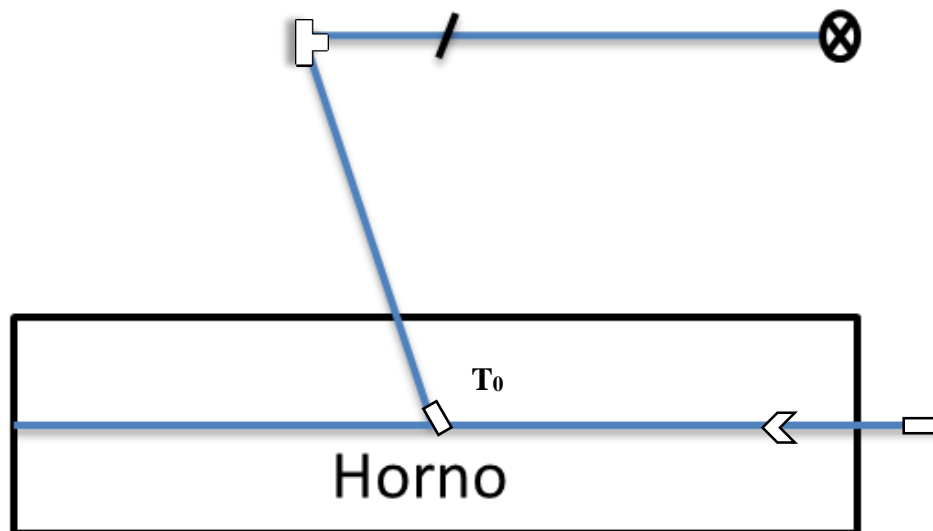


Figura 1-14. Tramo 1 (vista vertical).

Las características de este tramo se encuentran en la tabla 1-11:

Longitud y accidentes	Valor
Tramo recto (m)	4,8
Entrada redondeada (unidades)	8
Ensanchamiento (unidades)	1
Codo de 90° (unidades)	3
T Standard (unidades)	2
Válvula de mariposa	1

Tabla 1-11. Longitud y accidentes tramo 1.

6.3.2 Tramo Filtro

El esquema del tramo Filtro es el siguiente (figura 1-15):

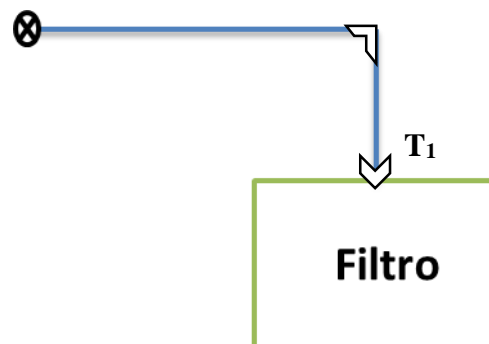


Figura 1-15. Tramo Filtro (Vista desde entrada horno).

Las conducciones de este tramo son simétricas, tal y como se puede ver en la figura 1-16:

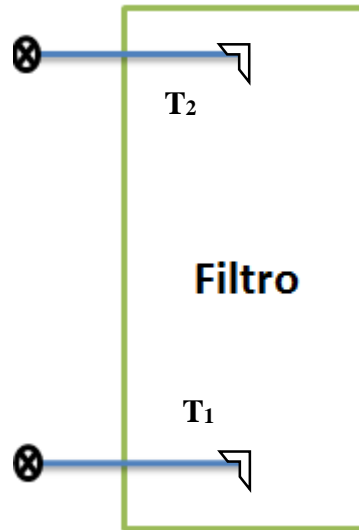


Figura 1-16. Tramo Filtro (vista vertical).

Por último, para entender mejor las conexiones de las conducciones del filtro se tiene la vista frontal del filtro en la figura 1-17:

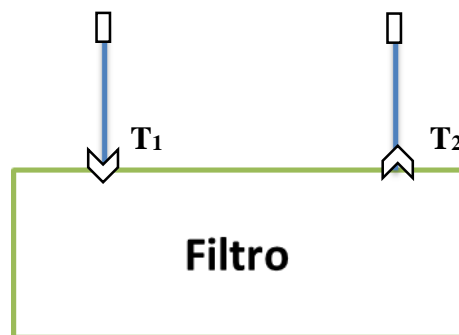


Figura 1-17. Tramo Filtro (vista frontal).

Las longitudes y accidentes de este tramo se recogen en la tabla 1-12:

Longitud y accidentes	Valor
Tramo recto (m)	4,0
Ensanchamiento (unidades)	1
Estrechamiento (unidades)	1
Codo de 90° (unidades)	2

Tabla 1-12. Longitud y accidentes del tramo filtro.

6.3.3 Tramo 2

El tramo 2 del sistema de depuración recoge los humos ya depurados del filtro y los dirige a la chimenea para ser expulsados. Además, en este tramo existe una dilución para refrigerar los humos procedentes del filtro.

El esquema del tramo dos se recoge en la figura 1-18:

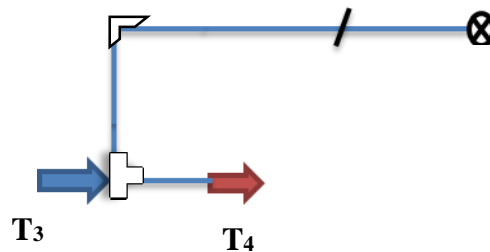


Figura 1-18. Tramo 2 (vista vertical).

La longitud y los accidentes de este tramo se encuentran en la tabla 1-13:

Longitud y accidentes	Valor
Tramo recto (m)	6,0
Entrada ligeramente redondeada (unidades)	1
Válvula de mariposa 10° (unidades)	1
Codo de 90° (unidades)	1
T standard (unidades)	1

Tabla 1-13. Longitud y accidentes del tramo 2

6.3.4 Pérdida de carga de las conducciones

La pérdida de carga producida en el sistema de depuración se calcula en el apartado 3 de Anexos, y se recoge en la tabla 1-14:

	Tramo Recto (Pa)	Accidentes (Pa)	Total (Pa)
Tramo 1	28,80	1.312,44	1.341,24
Filtro	-	-	245,25
Tramo 2	37,19	561,91	599,10
		Total	2.185,59

Tabla 1-14. Pérdidas de carga

Tal y como se observa en la tabla 1-14, la pérdida de carga producida por el tramo recto es despreciable a la producida por los accidentes. Por otro lado, se producen más pérdidas de carga en el primer tramo debido a la existencia de un mayor número de accidentes.

6.3.5 Potencia del ventilador

A partir de las pérdidas de carga se obtiene que la potencia necesaria para el sistema de depuración es de 10,7 kW (apartado 3.5 de Anexos).

Como el ventilador instalado en la empresa de estudio tiene una potencia superior a la necesaria (30 kW), no es necesario el cambio de ventilador. Esto supone un ahorro en la instalación del sistema de depuración.

6.4 Balance de energía térmico del sistema de depuración

6.4.1 Sistema sin aislamiento térmico

En el momento que se realiza la instalación, el sistema de depuración se encuentra sin aislamiento. Por ello, se realiza un análisis térmico para comprobar las pérdidas de calor que produce, además de la temperatura de salida de los gases.

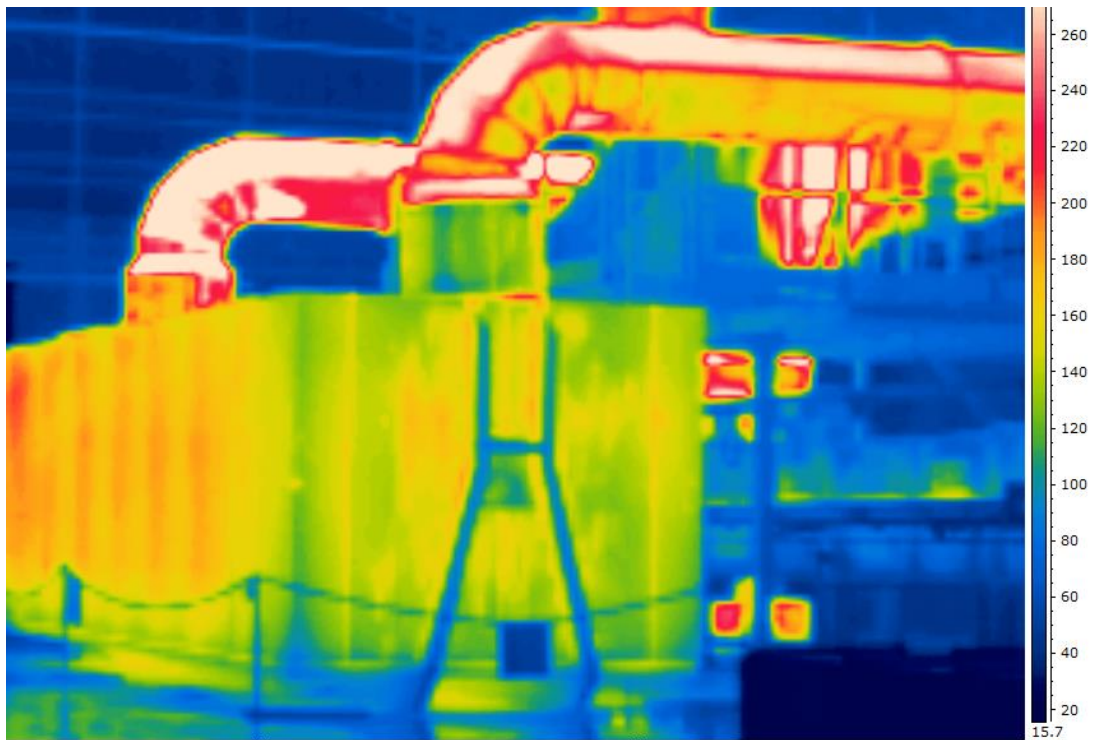
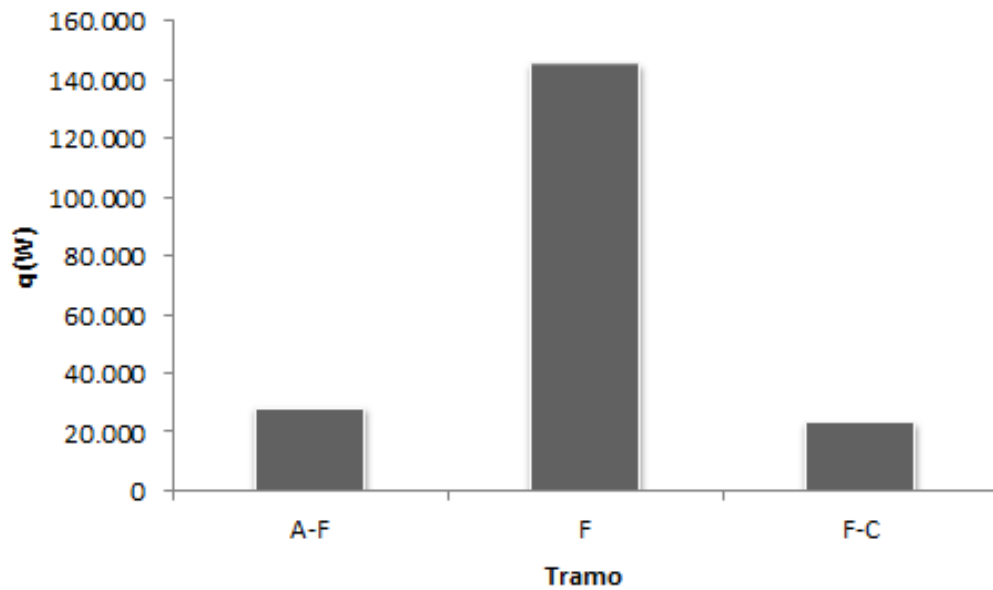


Imagen 1-2. Sistema de depuración sin aislamiento (la temperatura de las tuberías no corresponde a la real debido a la diferencia de emisividad entre el filtro y las tuberías)

Para ello se ha dividido el sistema en tres tramos:

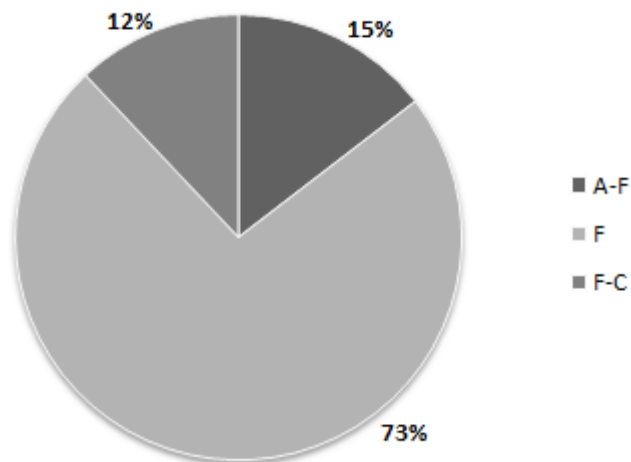
- Aspiración- Filtro (A-F)
- Filtro (F)
- Filtro-Chimenea (F-C)

Las pérdidas de calor en cada tramo vienen dadas por la gráfica 1-2:



Gráfica 1-2. Pérdidas de calor en cada tramo.

Al observar la gráfica 1-3 se llega a la conclusión de que la mayoría de pérdidas de calor se producen en el filtro:



Gráfica 1-3. Porcentaje de pérdidas de calor en el sistema de depuración.

Por ello, se realiza un estudio más exhaustivo al tramo Filtro.

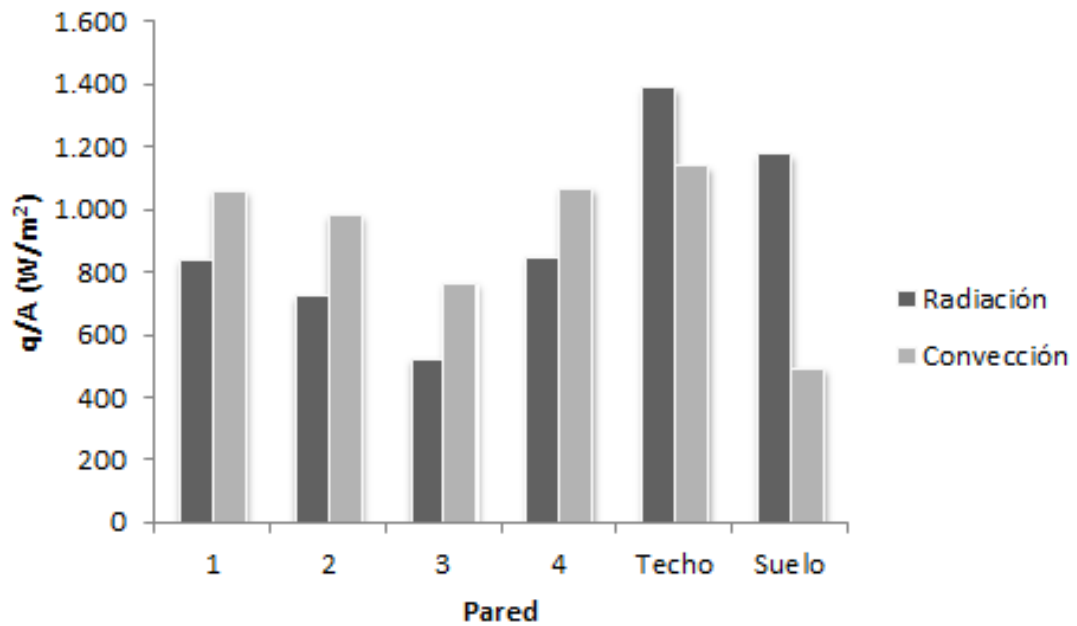
Las pérdidas de calor en el filtro no se producen de igual manera en cada pared. La cantidad de pérdidas depende de varios factores (tabla 1-15):

- Temperatura de pared (media)
- Temperatura del aire
- Posición de la pared (vertical, horizontal o suelo)
- Área de transmisión

Pared	Posición	T _a (°C)	T _p (°C)	A (m ²)
1	Vertical	27	188	5,32
2	Vertical	21	172	15,75
3	Vertical	21	145	5,32
4	Vertical	27	189	15,75
Techo	Horizontal Superior	27	155	17,32
Suelo	Horizontal Inferior	30	145	17,32

Tabla 1-15. Condiciones de las paredes del filtro.

Realizando los pertinentes balances de energía (punto 1 de Anexos) se obtiene en la gráfica 1-4 las pérdidas de calor por metro cuadrado en cada pared.



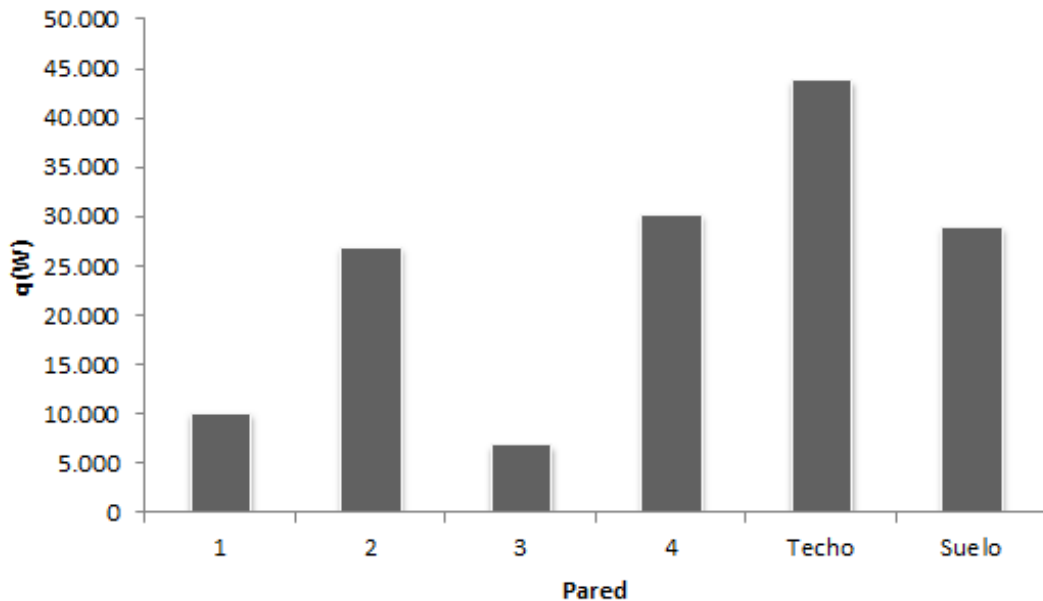
Gráfica 1-4. Comparación de las pérdidas por convección y radiación de cada pared.

De la gráfica 1-4 se pueden sacar varias conclusiones:

- Las pérdidas por convección son mayores que las pérdidas por radiación en las paredes verticales. Esto es debido a que la emisividad de los laterales es menor que la del techo y el suelo.
- Las pérdidas de calor producidas por la convección en el suelo son bastante reducidas debido a que la temperatura del aire es más alta que en las demás paredes. Además, como el suelo se encuentra menos ventilado que el resto de paredes, las pérdidas de calor por convección son menores.
- La pared con menos pérdidas de calor es la pared número 3. La causa de esto es que, además de ser la salida de los gases (parte más fría del filtro), está situada delante de una puerta con ventilación directa del exterior.

- La pared con más pérdidas de calor es el techo. Dos factores influyen en esto, la alta emisividad del techo (aumentando la radiación) y el alto coeficiente de convección de una pared horizontal.

Se cuantifica la pérdida de calor total en cada pared en la gráfica 1-5:



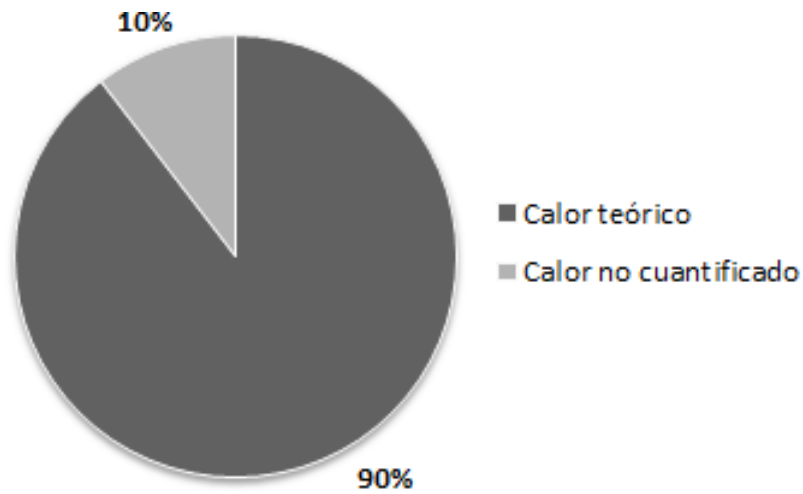
Gráfica 1-5. Pérdidas de calor por cada pared del filtro.

Con todo esto, en la tabla 1-16 se recogen las pérdidas de calor teóricas (suma de las pérdidas en cada tramo), reales y las no cuantificadas (pérdidas producidas por factores no considerados en el balance de energía teórico). Además, se muestra la temperatura en la chimenea.

	q (W)	T (°C)
Teórico	199.807	197
Real	221.880	190
No cuantificado	22.073	7

Tabla 1-16. Comparación balance teórico a balance real.

El calor teórico no cuantificado no es muy elevado, tal y como se recoge en el grafico 1-6:



Gráfica 1-6. Porcentaje de calor no cuantificado.

Finalmente, el diagrama de flujo procedente de los balances de energía del sistema de depuración sin aislar el siguiente (figura 1-19):

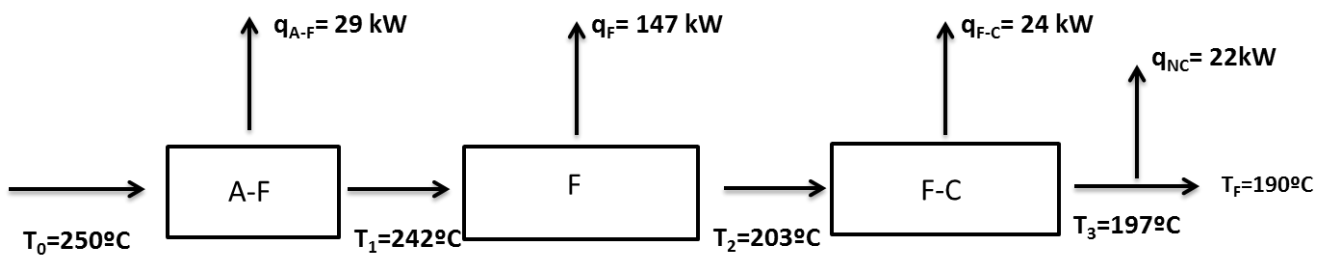


Figura 1-19. Diagrama de flujo del sistema sin aislamiento.

6.4.2 Sistema con aislamiento térmico

Debido a la cantidad de calor perdido, se realiza el aislamiento del sistema de depuración. Para ello se instala una capa de 8 cm de lana de roca alrededor del sistema de depuración. Esta capa tiene unos anclajes para facilitar su desmontaje y montaje a la hora de realizar el cambio de filtro.

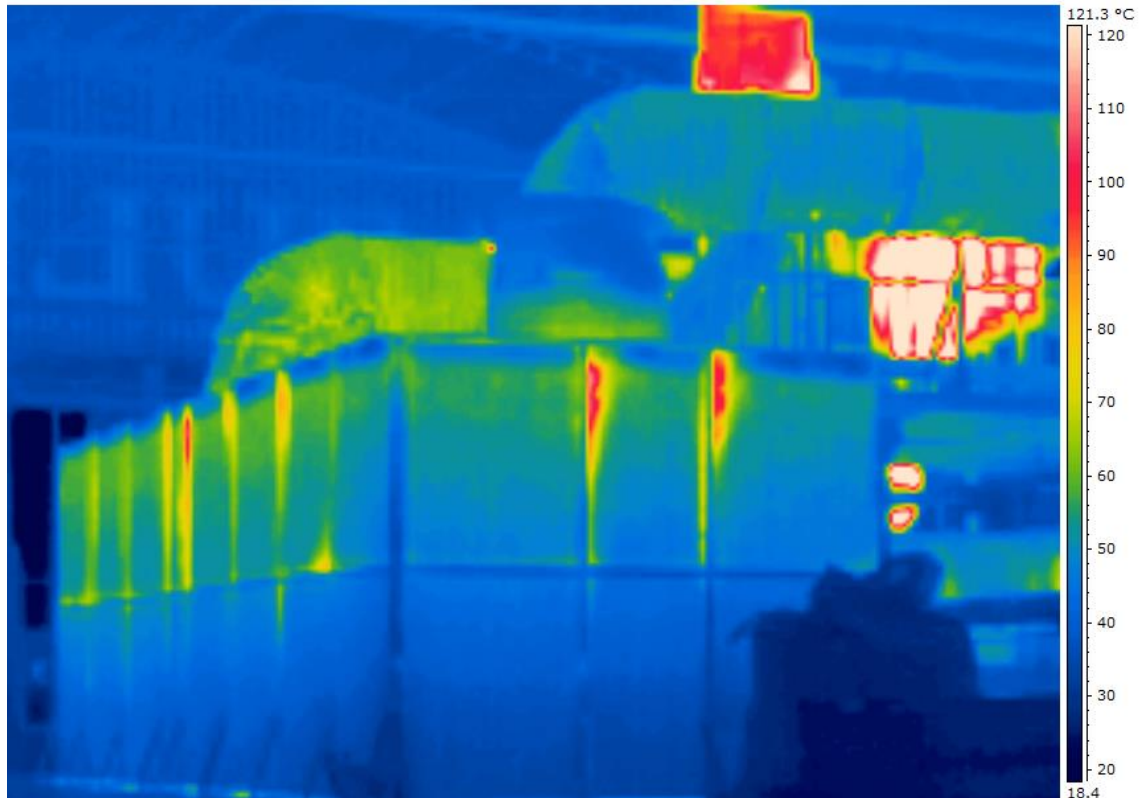
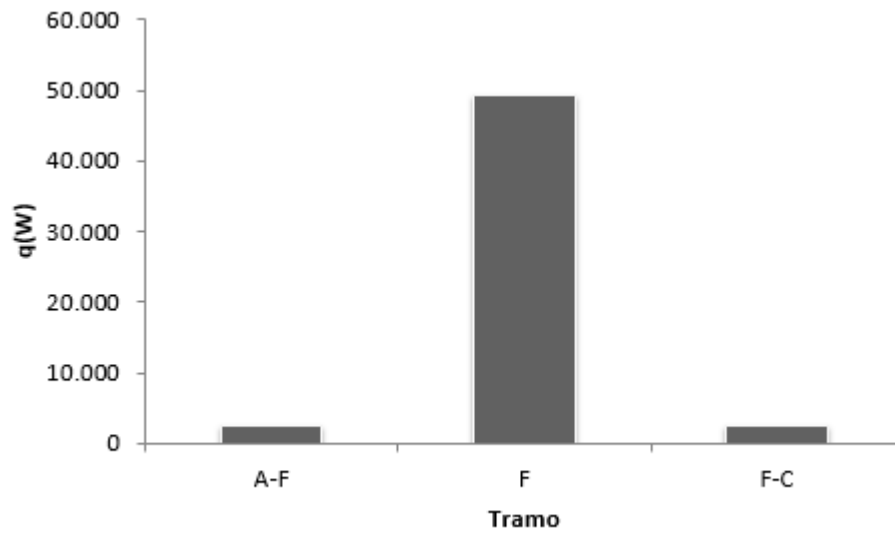


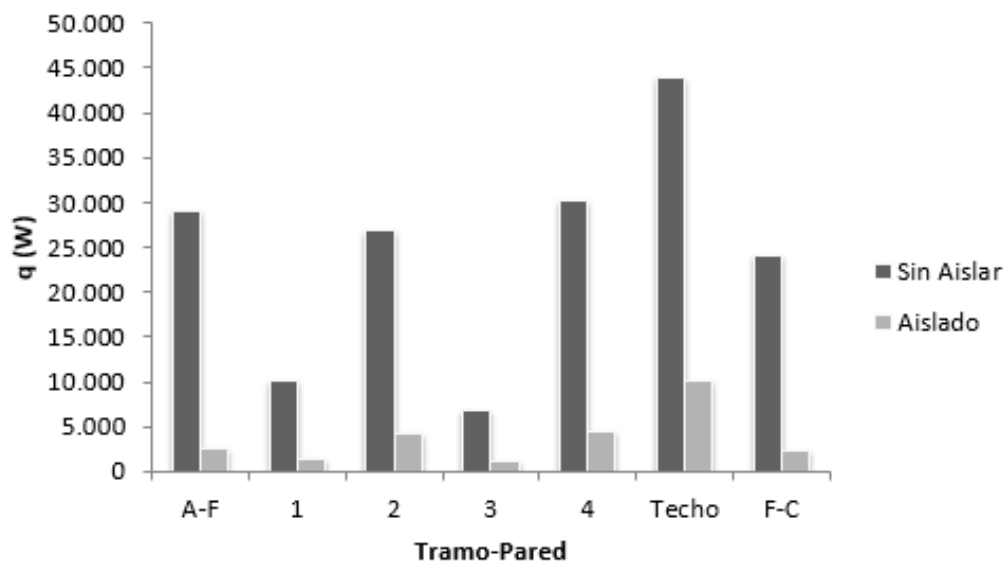
Imagen 1-3. Sistema de depuración aislado.

Las pérdidas de calor del sistema de depuración se encuentran en la gráfica 1-7:



Gráfica 1-7. Pérdidas de calor del sistema aislado.

La diferencia de pérdidas de calor debido al aislamiento se encuentra en la gráfica 1-8:



Gráfica 1-8. Comparación Sin Aislamiento-Aislado.

Con ello se recoge en la tabla 1-17 el rendimiento producido por el aislamiento:

Tramo-Pared	q _{Previa} (W)	q _{Posterior} (W)	Rendimiento (%)
A-F	28.984,9	2.538,0	91
1	10.125,6	1.342,5	87
2	26.888,9	4.309,0	84
3	6.854,5	1.210,9	82
4	30.220,6	4.562,9	85
Techo	43.820,6	10.028,3	77
Suelo	28.945,0	-	0
F-C	23.966,3	2.378,6	90
Total	221.880,0	60.847,0	73

Tabla 1-17. Rendimiento del aislamiento.

En la tabla 1-17 se observa que el aislamiento de las conducciones ha sido más eficiente que el del cajón del filtro. Por otro lado, el rendimiento global del aislamiento es del 73%.

El diagrama de flujo de la instalación se recoge en la figura 1-20:

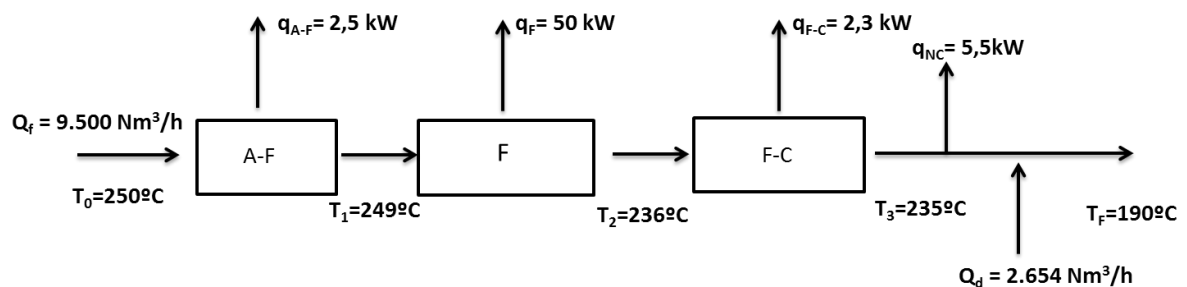


Figura 1-20. Diagrama de flujo del sistema de depuración aislado.

6.5 Balances de materia al sistema de depuración

A partir de las mediciones realizadas en la chimenea en el momento previo y en el momento posterior a la conexión del filtro se puede estimar el rendimiento del mismo (tabla 1-18):

Material cocido	C_0 (mg/Nm ³)	C_f (mg/Nm ³)	Rendimiento
Porcelánico Hexagonal	40,2	5,3	87%

Tabla 1-18. Rendimiento del sistema de depuración.

El balance de materia al sistema de depuración para una concentración de entrada media se muestra en la figura 1-21:

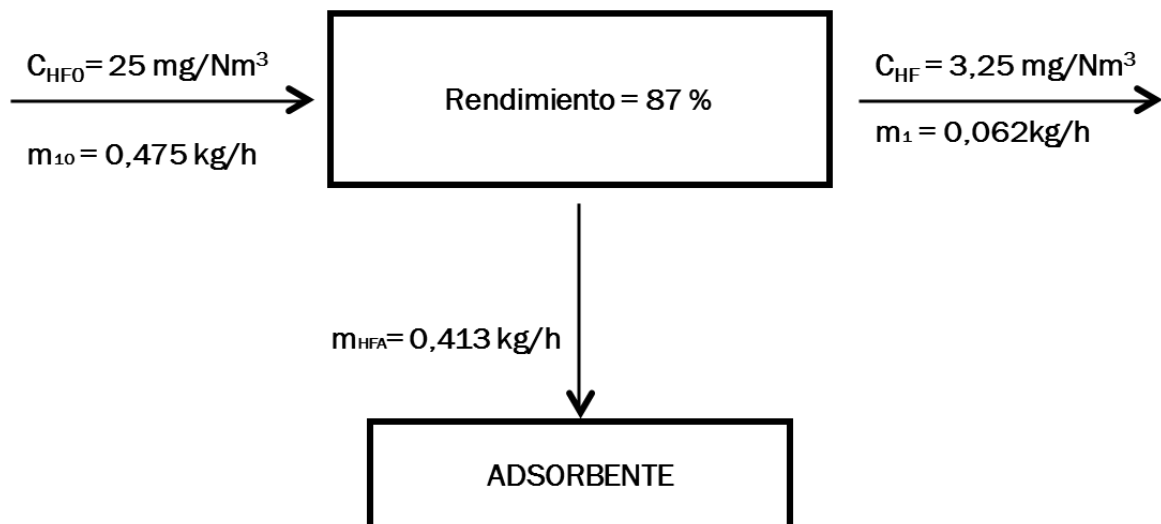
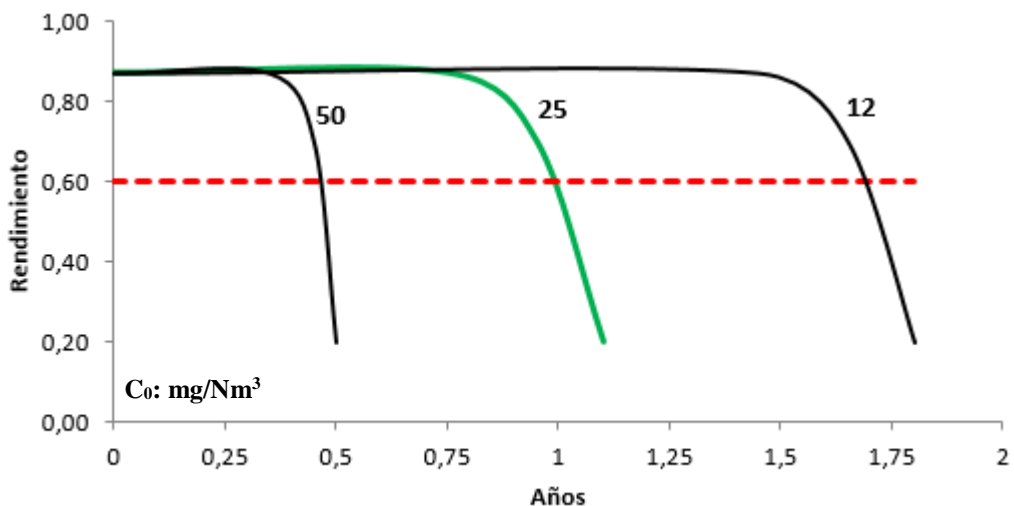


Figura 1-21. Balance de materia al sistema de depuración.

6.5.1 Duración del adsorbente

El tiempo de vida del adsorbente es un factor muy importante a la hora de la selección de un método de depuración respecto de otro.

Tal y como se observa en la gráfica 1-9, en los puntos de breakpoint el rendimiento del sistema de depuración comienza a descender, es decir, existe desaprovechamiento del lecho de adsorbente. Este punto es el momento en el que sería necesaria la sustitución del filtro. Sin embargo, la emisión de HF sigue cumpliendo la legalidad hasta que el filtro llegue al 60% de rendimiento (aproximadamente en un año en las condiciones de la empresa de estudio, 25 mg/Nm³).



Gráfica 1-9. Representación aproximada de la duración del sistema de depuración.

6.5.2 Proceso de sustitución del filtro

El procedimiento a seguir para la sustitución del filtro es el siguiente:

- Desconexión del filtro (apartado 6.6.2 de la Memoria)
- El filtro se engancha a un camión que se lo lleva fuera de las instalaciones.
- Un camión trae el filtro con el adsorbente nuevo y lo deja en el mismo lugar que se encontraba el anterior.
- Conexión del filtro (apartado 6.6.1 de la Memoria)

El tiempo de cambio tiene una duración aproximada de 30 minutos.

6.6 Arrancada y parada del filtro

La etapa de arrancada y de parada de los hornos, al igual que la conexión y desconexión del filtro, puede producir problemas en el buen funcionamiento del filtro.

El mayor problema asociado con la conexión/desconexión es la condensación de agua en el interior del mismo.

6.6.1. Arrancada del filtro

La arrancada del filtro es un punto crítico a la hora de querer conseguir un buen funcionamiento del sistema. Si el filtro entrara en funcionamiento mientras en el horno hay piezas cociéndose, el vapor de agua emitido por estas piezas condensaría en el interior del filtro debido al choque de este vapor con las paredes frías del filtro. Esto produciría el apelmazamiento del adsorbente, causando así, un aumento de pérdida de carga producida por el filtro.

Por esta razón es recomendable que, para poner en funcionamiento el filtro, el horno se encuentre vacío. Esta situación debe permanecer hasta que la temperatura de tiro supere los 110-120°C y así asegurar la no condensación del vapor de agua.

Otra problemática a la hora de realizar la conexión del filtro es mantener constante la depresión del horno.

Para ello se realiza un diagrama de flujo de la arrancada del sistema de depuración, el cual se encuentra en la figura 1-22. Siendo las válvulas las enumeradas en el punto 6.1.2 de la Memoria:

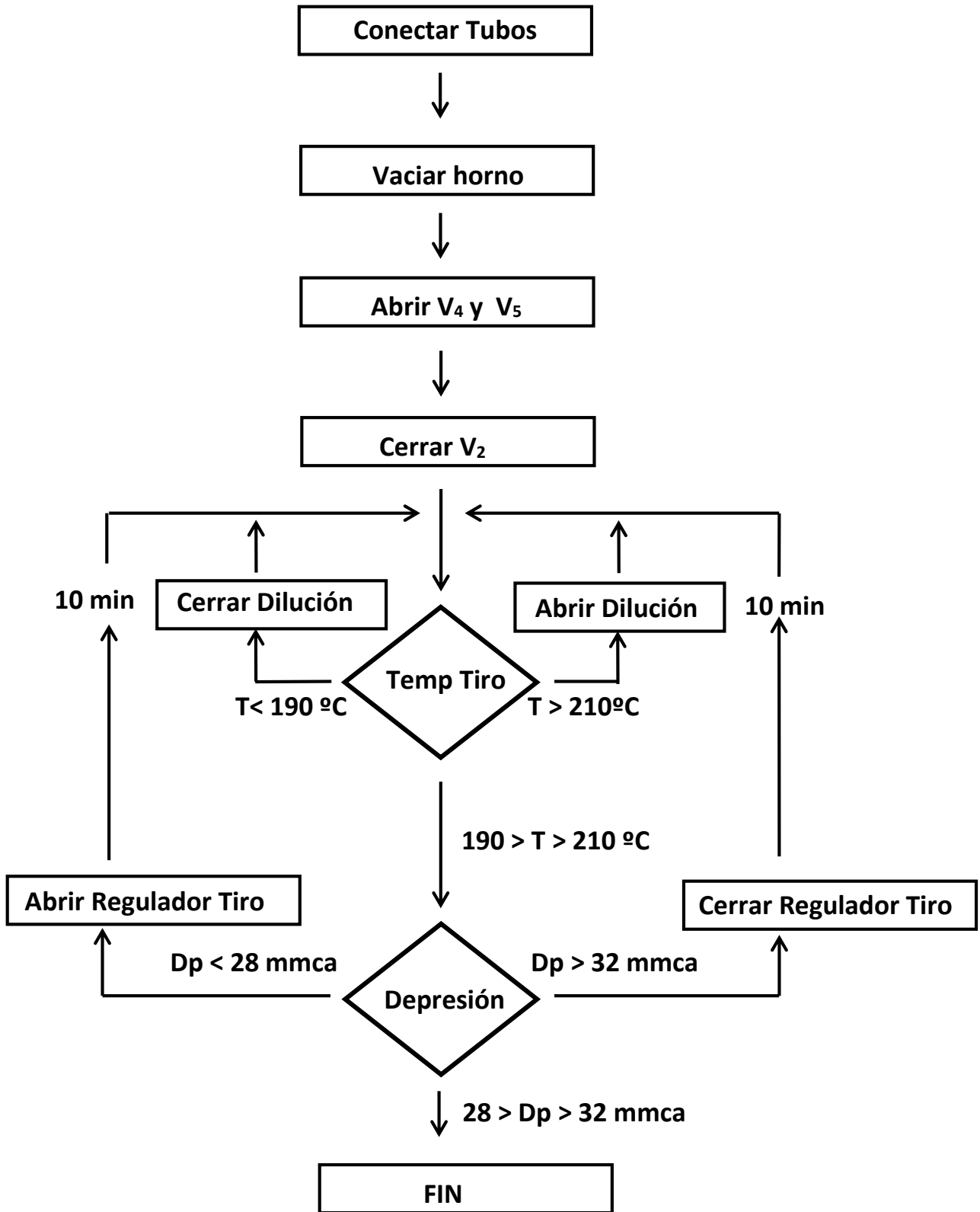


Figura 1-22. Diagrama de arrancada del sistema de depuración.

6.6.2 Parada del filtro

Al igual que en la arrancada, la desconexión del filtro puede producir la condensación del vapor de agua de las piezas en el interior del filtro. Para que se dé esta condensación es necesario que, al desconectar el filtro, el filtro contenga el vapor de agua procedente del horno. Este vapor se va enfriando poco a poco hasta llegar a condensar debido a la no entrada de gases calientes.

Además, la temperatura de la pared del filtro debe de ser menor a aproximadamente 60°C para evitar quemaduras a la hora de proceder a desconectar los tubos

En este caso el procedimiento para la desconexión del filtro se recoge en la figura 1-23:

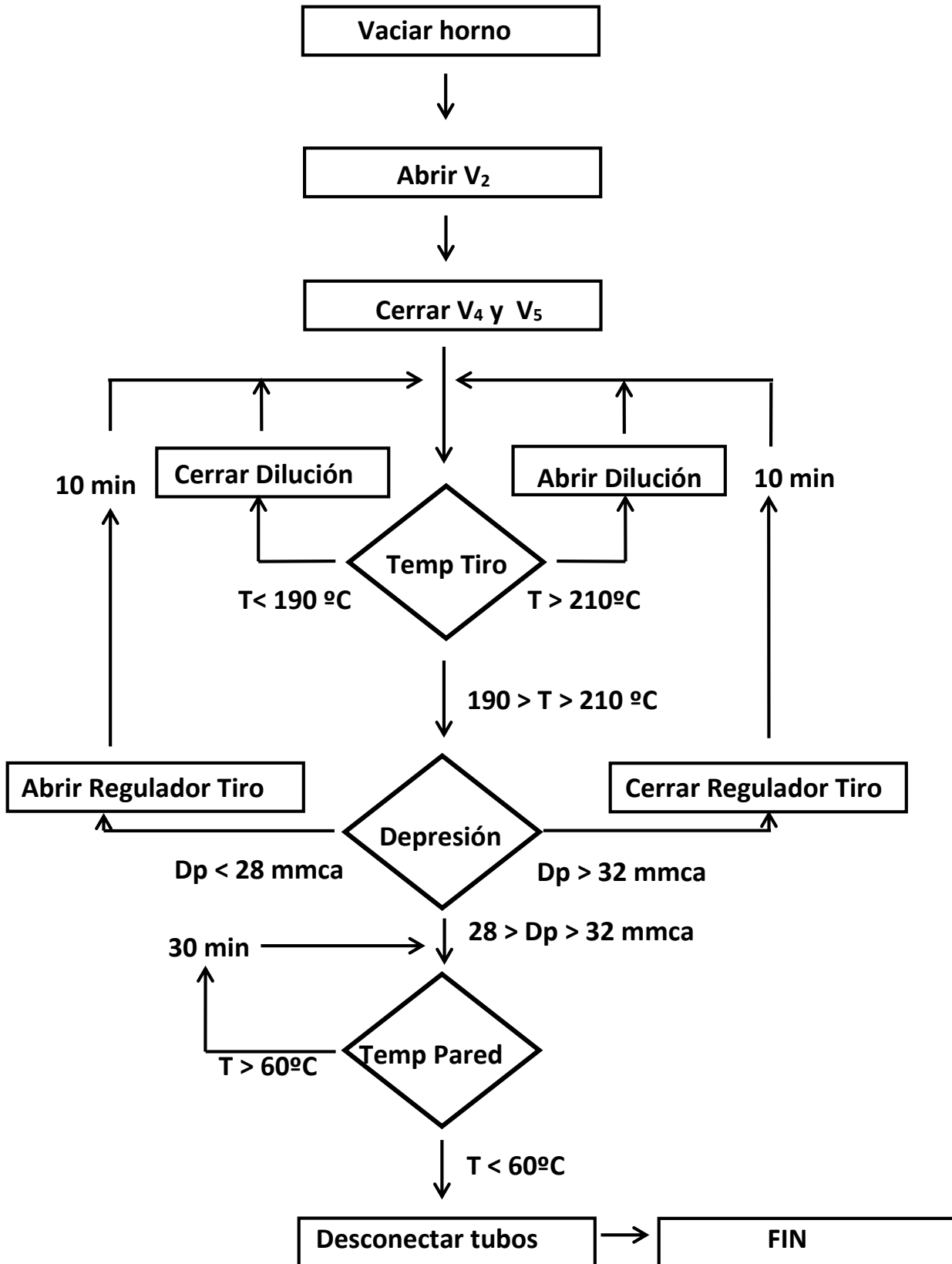


Figura 1-23. Diagrama de flujo de la desconexión del sistema de depuración.

6.6.3 Otros problemas

Además de los problemas en la parada y en la arrancada pueden producirse problemas con el filtro en funcionamiento.

El principal problema sigue siendo la condensación del vapor de agua. Para que este problema se produzca con los hornos en funcionamiento es necesario que la temperatura ambiente sea extremadamente baja, produciendo así que en las partes donde el filtro se encuentre más frío condense el vapor de agua (parte inferior del filtro más cercana a la salida de humos).

Otro problema que podría ocurrir es la obstrucción de los paneles agujereados donde está situado el adsorbente. Esta situación no dejaría pasar el humo por los orificios originando así una gran pérdida de carga en el sistema. Para que esta situación se produzca, los cilindros huecos deberían romperse debido a la pérdida de resistencia mecánica producida por el desgaste del adsorbente.

7 Emprendimiento

La instalación de los filtros de adsorción puede dar diversas oportunidades para el emprendimiento. Un ejemplo de ello es la empresa instaladora de filtros de adsorción, la cual se encarga del suministro de estos filtros y de la gestión del producto.

Además de ello, existen diversas oportunidades de emprendimiento:

- Fabricación del adsorbente.
- Instalación de equipos de medida de HF en continuo para optimizar el funcionamiento del filtro.
- Gestión de residuos para su reaprovechamiento.

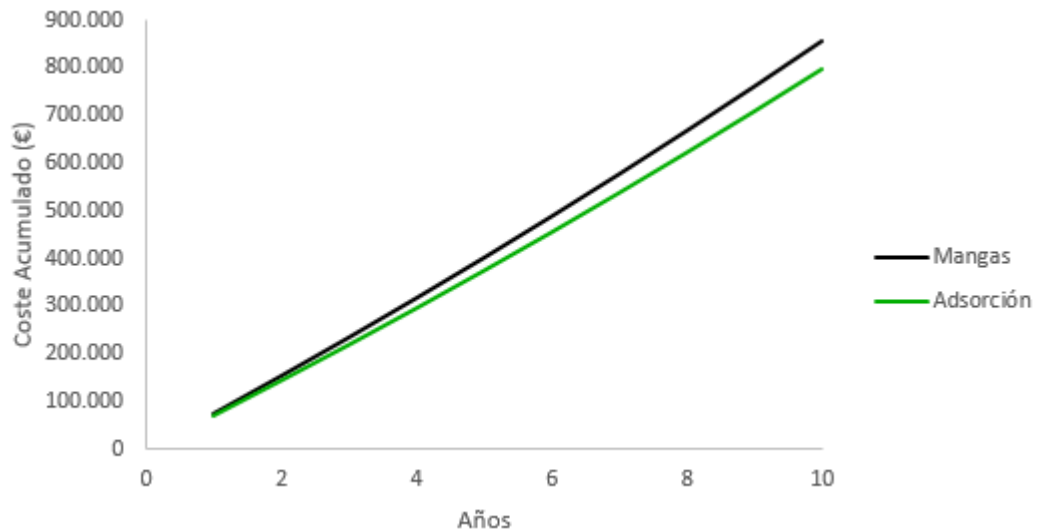
8 Estudio de viabilidad

Se realiza una comparación de costes entre el filtro de adsorción y el filtro de mangas en la tabla 1-19 aplicando un aumento anual con el IPC del 2,4%. Esta comparación se realiza en las condiciones de operación (apartado 4 de Anexos):

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Coste instalación (€)					
Filtro de mangas	16.563	16.961	17.368	17.784	18.211
Filtro de adsorción	3.498	3.582	3.668	3.756	3.846
Coste operación (€)					
Filtro de mangas	60.098	61.541	63.018	64.530	66.079
Filtro de adsorción	67.979	69.610	71.281	72.991	74.743
Coste Total (€)					
Filtro de mangas	76.661	78.501	80.385	82.314	84.290
Filtro de adsorción	71.477	73.192	74.949	76.747	78.589
	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Coste instalación (€)					
Filtro de mangas	18.648	19.096	19.554	20.023	20.504
Filtro de adsorción	3.938	4.033	4.130	4.229	4.330
Coste operación (€)					
Filtro de mangas	67.665	69.289	70.952	72.654	74.398
Filtro de adsorción	76.537	78.374	80.255	82.181	84.153
Coste Total (€)					
Filtro de mangas	86.313	88.385	90.506	92.678	94.902
Filtro de adsorción	80.476	82.407	84.385	86.410	88.484

Tabla 1-19. Coste total.

En la gráfica 1-10 se representa el coste acumulado anualmente de los dos sistemas de depuración:



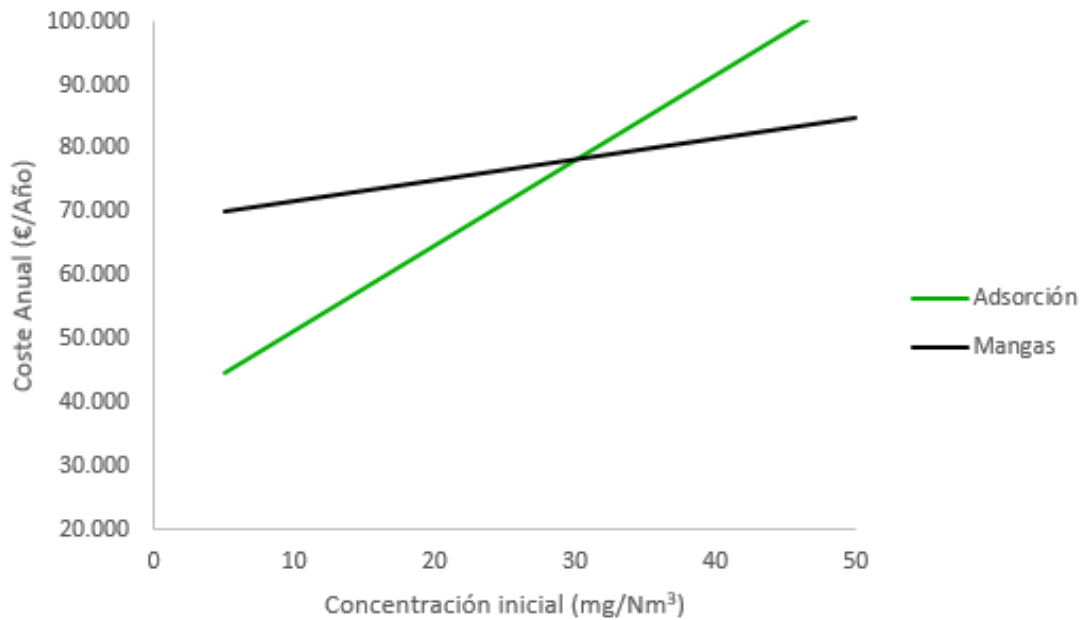
Gráfica 1-10. Coste acumulado

Tal y como se observa en la tabla 1-19, el filtro de mangas tiene un coste de instalación anual mayor que el filtro de adsorción. Esto es debido a que la infraestructura necesaria para su funcionamiento es mucho más compleja que para el filtro de adsorción.

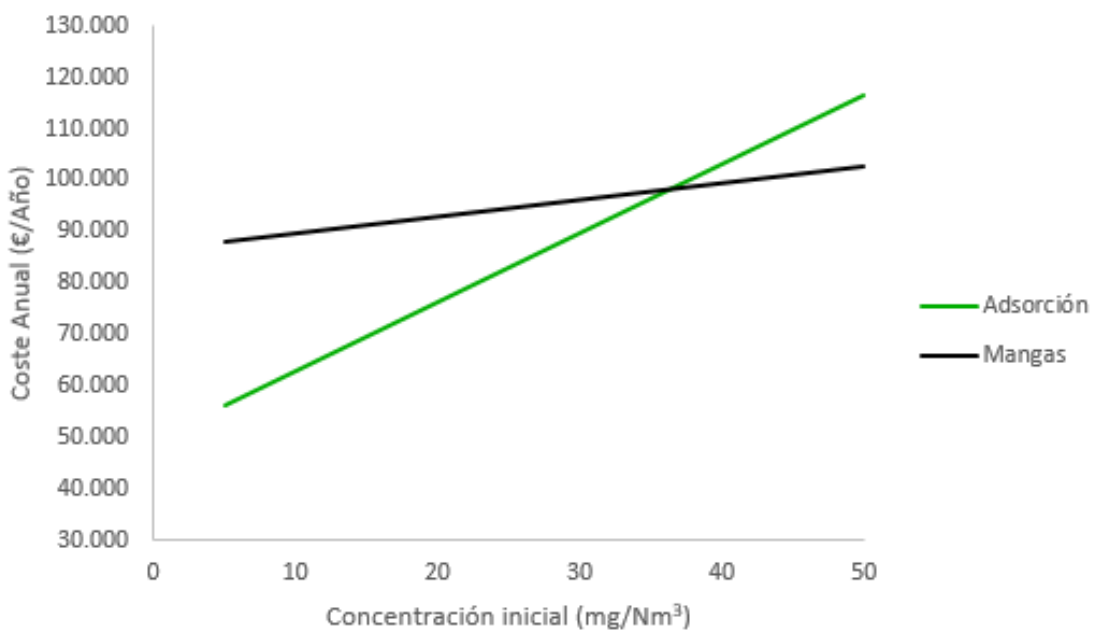
Por otro lado, el coste de operación es mayor en el filtro de adsorción que en el filtro de mangas en el caso estudiado (25 mg/Nm^3 y $P=0,1 \text{ €/kWh}$).

En conclusión, para el caso estudiado, en el intervalo de 10 años es más rentable la instalación del filtro de adsorción.

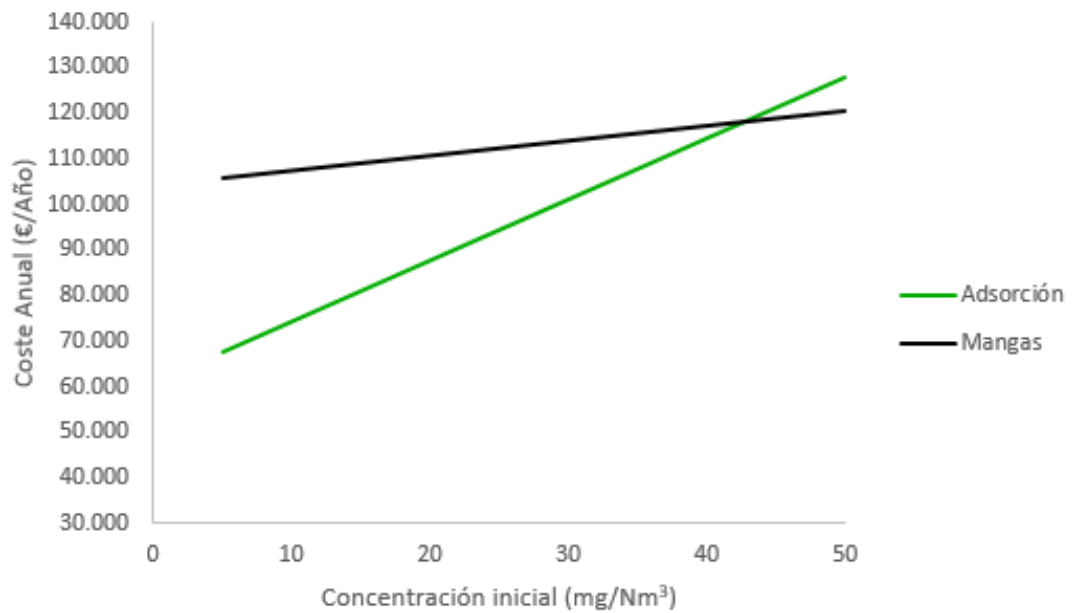
Sin embargo, se realiza un estudio de la variación del coste de ambos sistemas con la concentración inicial y el coste de la electricidad en las gráficas 1-11, 1-12 y 1-13:



Gráfica 1-11. Comparación mangas-adsorción. P=0,10 €/kWh.



Gráfica 1-12. Comparación mangas-adsorción. P=0,15 €/kWh.



Gráfica 1-13. Comparación mangas-adsorción. P=0,20 €/kWh.

Como se observa en los gráficos anteriores, el efecto del coste de la electricidad tiene más incidencia en el coste del filtro de mangas que en el filtro de adsorción. Por lo que, si la empresa cuenta con un sistema de cogeneración que consiga abaratar el coste de la electricidad, el filtro de adsorción sería una buena opción.

Existe un intervalo donde la concentración de entrada y el coste de la electricidad hace que el coste anual de los dos sistemas se iguale (tabla 1-20).

Precio eléctrico (€/kWh)	Concentración de corte (mg/Nm ³)
0,10	30
0,15	36
0,20	43

Tabla 1-20. Concentración de corte.

9 Resumen del presupuesto

En la tabla 1-21 se detalla el presupuesto del material y el coste de realizar la operación de cambio de filtro (apartado 1 y 2 de Presupuesto):

Material (€)	Cambio de filtro (€)
34.980,41	34.773,00

Tabla 1-21. Coste de materiales y cambio de filtro.

Por otro lado, el coste de la inversión inicial se recoge en la tabla 1-22 (apartado 3 de Presupuesto)

PEM (€)	PECp (€)	Inversión Inicial (€)
34.980,41	41.276,88	49.945,02

Tabla 1-22. Inversión inicial.



2. Anexos

0. Índice

0.	Índice.....	2
1.	Balances de energía	5
1.1	Sistema de depuración sin aislar	6
1.1.1	Tramo Aspiración-Filtro	6
1.1.2	Tramo Filtro	9
1.1.3	Tramo Filtro-Chimenea.....	13
1.1.4	Pérdidas de calor totales.....	14
1.1.5	Pérdidas de calor no cuantificables	14
1.2	Sistema de depuración aislado	15
1.2.1	Tramo Aspiración-Filtro	15
1.2.2	Tramo Filtro	16
1.2.3	Tramo Filtro-Chimenea.....	18
1.2.4	Pérdidas de calor totales.....	20
1.2.5	Pérdidas de calor no cuantificables	20
1.2.6	Cálculo de la dilución.....	20
2.	Balance de materia.....	21
2.1	Rendimiento del sistema de depuración.....	21
2.2	Tiempo de saturación	22
3.	Cálculo de la pérdida de carga.....	24
3.1	Tramo 1	24
3.1.1	Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por el tramo recto	27
3.1.2	Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por los accidentes.....	29
3.2	Tramo Filtro	31
3.3	Tramo 2	33

3.3.1	Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por el tramo recto....	33
3.3.2	Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por los accidentes....	35
3.4	Pérdida de carga total	35
3.5	Potencia del ventilador.....	35
4.	Comparación filtro mangas-filtro adsorbente	36
4.1	Filtro de mangas.....	36
4.1.1	Costes de la instalación	36
4.1.2	Costes de operación	40
4.1.3	Coste total.....	42
4.2	Filtro adsorbente.....	44
4.2.1	Coste de instalación.....	44
4.2.2	Coste de operación	44
4.2.3	Coste Total	44
5.	Estudio básico de seguridad.....	46
6.	Anexo de imágenes térmicas	51
6.1	Sin aislamiento	51
6.1.1	Pared 1.....	51
6.1.2	Pared 2.....	52
6.1.3	Pared 3.....	53
6.1.4	Pared 4.....	54
6.1.5	Techo.....	54
6.2	Con aislamiento.....	56
6.2.1	Pared 1.....	56
6.2.2	Pared 2.....	57
6.2.3	Pared 3.....	58

6.2.4 Pared 4.....	59
6.2.5 Techo.....	60
7. Anexo gráficas	62

1. Balances de energía térmica

Por un lado, se realizan los balances de energía asociados al filtro y a las conducciones del filtro. En estos balances se obtiene la temperatura de entrada de los gases al filtro, la temperatura de los gases a la salida del filtro y la temperatura de los gases en el tiro.

Se ha dividido el sistema de depuración de la siguiente manera:

- Tramo desde la aspiración de los gases hasta la entrada al filtro.
- Tramo que ocupa el filtro.
- Tramo desde la salida del filtro hasta la dilución (desactivada sin aislamiento).
- Tramo desde la dilución hasta la salida de los gases del sistema.

Las conducciones donde se realizan los pertinentes balances de energía tienen las siguientes características:

- Acero al carbono M S 195T
- Diámetro externo = 0,603 m
- Diámetro interno = 0,531 m

Se han realizado varias suposiciones a la hora de realizar los balances de energía:

1. El diámetro es constante en toda la conducción (pese a que hay una parte con un diámetro menor), ya que se ha estimado que el error cometido es mínimo.
2. Se toma como temperatura de pared para el cálculo del coeficiente de radiación la temperatura de pared al inicio de cada tramo.
3. El calor específico de los gases no varía significativamente con la temperatura. Como se trabaja en un intervalo de 150-250°C se coge un calor específico medio de 1100 kJ/(kg K).

1.1 Sistema de depuración sin aislar

1.1.1 Tramo Aspiración-Filtro

El tramo A-F tiene una longitud de 6,8 m, ya que se despreciarán las pérdidas de calor producidas antes del ensanchamiento.

En primer lugar, se define la corriente de entrada y la temperatura de pared de la conducción:

- $Q_{CR} = 5,04 \text{ m}^3/\text{s}$
- $T_0 = 250^\circ \text{ C}$

El coeficiente global de transmisión de calor viene dado por la siguiente ecuación:

$$U = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_e}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_{ci}} + \sum_{\text{capas}} \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_i} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot h_{cre}}}$$

Siendo:

- U : Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
- r_i : Radio interior de la conducción (m)
- r_e : Radio exterior de la conducción (m)
- k_i : Conductividad térmica del material de cada capa ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$)
- h_{ci} : Coeficiente de convección en el interior de la conducción ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)
- h_{hcre} : Coeficiente de convección más coeficiente de radiación en el exterior de la conducción ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

La ecuación utilizada para el cálculo del coeficiente de convección interior es:

$$h_{ci} = (3,76 - 0,00497 \cdot T_0) \cdot \frac{\nu^{0,8}}{D_i^{0,2}}$$

Siendo:

- v : Velocidad de los gases en la conducción (m/s)
- D_i : Diámetro interior de la conducción (m)
- T_0 : Temperatura del humo ($^{\circ}\text{C}$)

$$h_{ci} = (3,76 - 0,00497 \cdot 250) \cdot \frac{22,83^{0,8}}{0,531^{0,2}} = 34,89 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Para la convección en el exterior del tubo se utiliza la ecuación:

$$h_{ce} = 1,17 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_e}}$$

Siendo:

- h_{ce} : Coeficiente de convección en el exterior de la tubería ($W/(m^2 \cdot K)$)
- D_e : Diámetro exterior de la conducción (m)
- ΔT : Diferencia entre la temperatura de pared y la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

$$h_{ce} = 1,17 \cdot \sqrt[4]{\frac{(166 - 27)}{0,603}} = 4,55 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

En cuanto al coeficiente de radiación se utiliza la ecuación:

$$h_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)$$

Siendo:

- σ : Constante de Stefan-Boltzman ($W/(m^2 \cdot K^4)$)
- ε : Emisividad
- T_p : Temperatura superficial de la pared (K)
- T_a : Temperatura del aire ambiente (K)

$$h_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (439 + 300) \cdot (439^2 + 300^2) = 10,66 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con ello se calcula el coeficiente global de transmisión de calor del tramo:

$$U_{A-F} = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,531}{2}} \cdot 34,89 + \frac{\ln\left(\frac{\frac{0,603}{2}}{\frac{0,531}{2}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 50} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2}} \cdot (10,66 + 4,55)}$$

$$U = 10,09 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Finalmente se plantean las ecuaciones de cálculo de flujo de calor:

$$q = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot (T_0 - T_a) \cdot L$$

Siendo:

- q : Flujo de calor (W)
- T_0 : Temperatura inicial en el interior de la conducción ($^{\circ}C$)
- T_a : Temperatura del aire ambiente ($^{\circ}C$)
- L : Longitud del tramo (m)

$$q = 10,09 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2} \cdot (250 - 27) \cdot 6,8 = 28.984,92 \text{ W}$$

Finalmente, con el flujo de calor calculado en la ecuación anterior, se puede calcular la temperatura de los gases de combustión al final del tramo:

$$q = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \cdot C_p \cdot (T_0 - T_1)$$

Siendo:

- ρ : Densidad en condiciones normales (kg/m^3)
- C_p : Calor específico del gas ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

$$28.984,92 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (250 - T_1) \rightarrow T_1 = 242,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1.1.2 Tramo Filtro

Como existe una disminución de la temperatura, el caudal real disminuye:

- Q_{CR} : $4,98 \text{ m}^3/\text{s}$
- T_1 : $242,3^\circ\text{C}$

Además, como existe una puerta con ventilación exterior existen varias temperaturas del aire:

- T_{a1} : 27°C (Paredes 1,4 y techo)
- T_{a2} : 21°C (Paredes 2 y 3)
- T_{a3} : 30°C (Suelo)

Así pues, el cálculo de flujo de calor es la suma del calor perdido por radiación más el calor perdido por convección:

$$\frac{q}{A} = q_{rad} + q_{conv}$$

Siendo:

- q : Flujo de calor (W)

- A: Área de transmisión (m^2)
- q_{rad} : Pérdidas de calor por radiación (W/m^2)
- q_{conv} : Pérdidas de calor por convección (W/m^2)

Sustituyendo términos en la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{q}{A} = C \cdot \varepsilon \cdot \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right) + p \cdot (T_s - T_a)^{1,25}$$

Siendo.

- C: Constante de radiación de calor ($5,67 \text{ (J/(m}^2\text{sK}^4))$)
- ε : Emisividad. (Calculada experimentalmente, 0,40 para las paredes verticales del filtro y 0,94 para el techo y el suelo)
- T_s : Temperatura de la pared (K)
- T_a : Temperatura del aire (K)
- p: Constante de convección (1,85 para el techo, 2,5 para paredes verticales y 1,31 para el suelo ($J/(m^2\text{sK}^{1,25}))$)

Pared 1

La temperatura media de la pared 1 es $188,1^\circ\text{C}$, por lo que el flujo de calor de esta pared es:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,4 \cdot \left(\left(\frac{188,1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{27 + 273}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (188,1 - 27)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 841,52 + 1061,79 = 1.903,32 \text{ W/m}^2$$

Las pérdidas de calor se obtienen multiplicando el valor de la densidad de calor por el área de la pared:

$$q = 1.903,32 \frac{W}{m^2} \cdot 5,32 \text{ m}^2 = 10.125,6 \text{ W}$$

Pared 2

La temperatura media de la pared 2 es 172,5°C:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,4 \cdot \left(\left(\frac{172,5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{21 + 273}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (172,5 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 723,93 + 983,30 = 1.707,23 \text{ W/m}^2$$

$$q = 1.707,23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 15,75 \text{ m}^2 = 26.888,9 \text{ W}$$

Pared 3

La temperatura media de la pared 3 es 145 °C.

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,4 \cdot \left(\left(\frac{145 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{21 + 273}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (145 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 522,93 + 765,50 = 1.288,44 \text{ W/m}^2$$

$$q = 1.288,44 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 5,32 \text{ m}^2 = 6.854,5 \text{ W}$$

Pared 4

La temperatura media de la pared 4 es 189°C. La temperatura de esta pared es superior a las demás debido a su proximidad con el horno:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,4 \cdot \left(\left(\frac{189 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{27 + 273}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (189 - 27)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 849,55 + 1.069,21 = 1.918,77 \text{ W/m}^2$$

$$q = 1.918,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 15,75 \text{ m}^2 = 30.220,6 \text{ W}$$

Techo

La temperatura media del techo es 155°C. Para la realización del cálculo de pérdidas de calor se toma como emisividad 0,94 y como parámetro de convección, 2,5 (pared horizontal).

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,94 \cdot \left(\left(\frac{155 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{21 + 273}{100} \right)^4 \right) + 2,5 \cdot (155 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 1.390,28 + 1.139,77 = 2.530,05 \text{ W/m}^2$$

$$q = 2.530,05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 17,32\text{m}^2 = 43.820,6 \text{ W}$$

Suelo

Como no es posible realizar una medición experimental de la temperatura de pared del suelo, se estima mediante la media de la temperatura de la zona inferior de cada pared vertical. Por lo que la temperatura de pared del suelo es 145°C.

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,94 \cdot \left(\left(\frac{145 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{30 + 273}{100} \right)^4 \right) + 1,31 \cdot (145 - 30)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 1.177,86 + 493,33 = 1.671,19 \text{ W/m}^2$$

$$q = 1.671,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 17,32\text{m}^2 = 28.945,0 \text{ W}$$

La suma total del calor perdido por el filtro es:

$$q = 10.125,6 + 26.888,9 + 6.854,5 + 30.220,6 + 43.820,6 + 28.945,0$$

$$q = 146.855,40 \text{ W}$$

Con el flujo de calor se obtiene la temperatura a la salida del filtro:

$$q = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

$$146.855,40 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (242,3 - T_2) \rightarrow T_2 = 203^\circ C$$

1.1.3 Tramo Filtro-Chimenea

La longitud de este tramo es de 8 m.

En este tramo se conecta el filtro directamente con la chimenea sin ser necesaria una dilución debido a que la temperatura a la salida del filtro es adecuada para el ventilador.

Las condiciones de entrada son:

- Q_{CR} : 4,61 m³/s
- T_2 : 203 °C
- T_{PF} : 119° C

El procedimiento es similar al utilizado en el apartado 1.1.1:

Coefficiente de convección interior:

$$h_{ci} = (3,76 - 0,00497 \cdot 203) \cdot \frac{20,81^{0,8}}{0,531^{0,2}} = 35,39 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de convección exterior:

$$h_{ce} = 1,17 \cdot \sqrt[4]{\frac{(119 - 27)}{0,603}} = 4,11 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de radiación:

$$h_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (392 + 300) \cdot (392^2 + 300^2) = 8,60 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente global de transferencia de calor:

$$U_{F-C} = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,531}{2} \cdot 35,38} + \sum_{capas} \frac{\ln\left(\frac{0,603}{0,531}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 50} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2} \cdot (4,11 + 8,60)}}$$

$$U_{F-C} = 8,97 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Flujo de calor:

$$q_{F-C} = 8,97 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,603}{2} \cdot (203,3 - 27) \cdot 8 = 23.966,35 W$$

Temperatura final de la chimenea:

$$23.966,35 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (203,3 - T_3) \rightarrow T_3 = 197 \text{ } ^\circ\text{C}$$

1.1.4 Pérdidas de calor totales

$$q_{total} = q_{A-F} + q_F + q_{F-C} = 199.807 W = q_{teórica}$$

1.1.5 Pérdidas de calor no cuantificables

Las pérdidas de calor no cuantificables son la diferencia entre las pérdidas de calor reales y las pérdidas de calor teóricas.

$$q_{real} = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (250 - 191) = 221.880 W$$

Por lo que las pérdidas no cuantificables son:

$$q_{NC} = q_{real} - q_{teórica} = 221.880 - 199.807 = 22.073 W$$

1.2 Sistema de depuración aislado

Se ha aplicado una capa de lana de roca de 8 cm, con una conductividad térmica de $k = 0,038 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$ y una emisividad determinada de forma experimental de 0,8.

1.2.1 Tramo Aspiración-Filtro

Condiciones de entrada:

- $Q_{CR} = 5,04 \text{ m}^3/\text{s}$
- $T_0 = 250^\circ \text{ C}$
- $T_{p1} = 64,3^\circ \text{ C}$

Se aplica el procedimiento del punto 1.1.1 de los Anexos:

$$h_{ci} = 34,89 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_{ce} = 1,17 \cdot \sqrt[4]{\frac{(64,3 - 27)}{0,683}} = 3,18 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot (337,3 + 300) \cdot (337,3^2 + 300^2) = 5,09 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$U = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,531}{2}} \cdot 34,89 + \frac{\ln\left(\frac{0,603}{0,531}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 40} + \frac{\ln\left(\frac{0,683}{0,603}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,038} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2} \cdot (5,09 + 3,18)}}$$

$$U = 0,78 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\frac{q}{L} = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot (T_0 - T_a)$$

$$q = 0,78 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2} \cdot (250 - 27) \cdot 6,8 = 2.538,00 \text{ W}$$

$$q = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \cdot C_p \cdot (T_0 - T_1)$$

$$2.538,00 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (250 - T_1) = 249 \text{ }^\circ\text{C}$$

Es decir, la pérdida de calor en el tramo A-F es prácticamente despreciable.

1.2.2 Tramo Filtro

En este tramo se procede a calcular la temperatura de cada pared del filtro.

Pared 1

La temperatura media de la pared 1 es 52,9°C, por lo que el flujo de calor de esta pared es:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \left(\left(\frac{325,9}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (52,9 - 27)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 144,27 + 108,09 = 252,36 \text{ W/m}^2$$

Las pérdidas de calor producidas por la pared son:

$$q = 252,36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 5,32 \text{ m}^2 = 1.342,5 \text{ W}$$

Pared 2

La temperatura media de la pared 2 es 49,5°C:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \left(\left(\frac{322,5}{100} \right)^4 - \left(\frac{294}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (49,5 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 151,77 + 121,82 = 273,59 \text{ W/m}^2$$

$$q = 273,59 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 15,75 \text{ m}^2 = 4.309,1 \text{ W}$$

Pared 3

La temperatura media de la pared 3 es 45,4 °C.

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \left(\left(\frac{318,4}{100} \right)^4 - \left(\frac{294}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (45,4 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 127,29 + 100,32 = 227,61 \text{ W/m}^2$$

$$q = 227,61 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 5,32 \text{ m}^2 = 1.210,9 \text{ W}$$

Pared 4

La temperatura media de la pared 4 es 56,1°C.:

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \left(\left(\frac{329,1}{100} \right)^4 - \left(\frac{300}{100} \right)^4 \right) + 1,85 \cdot (56,1 - 27)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 164,67 + 125,03 = 289,70 \text{ W/m}^2$$

$$q = 289,70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 15,75 \text{ m}^2 = 4.562,9 \text{ W}$$

Techo

La temperatura media del techo es 67,8°C.

$$\frac{q}{A} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \left(\left(\frac{340,8}{100} \right)^4 - \left(\frac{294}{100} \right)^4 \right) + 2,5 \cdot (67,8 - 21)^{1,25}$$

$$\frac{q}{A} = 272,99 + 306,01 = 579,010 \text{ W/m}^2$$

$$q = 579,00 \frac{W}{m^2} \cdot 17,32m^2 = 10.028,3 W$$

Suelo

Como en la parte inferior no se ha aplicado ningún tipo de aislamiento, se realiza la aproximación de que la pérdida de calor es similar a la del sistema de depuración sin aislamiento:

$$q = 1.671,19 \frac{W}{m^2} \cdot 17,32m^2 = 28.945,0 W$$

La suma total del calor perdido por el filtro es:

$$q = 1.342,5 + 4.309,0 + 1.210,9 + 4.562,9 + 10.028,3 + 28.945,0$$

$$q = 50.398,78W$$

Con el flujo de calor se obtiene la temperatura a la salida del filtro:

$$q = Q_{CN} \cdot \rho_{CN} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

$$50.398,78 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (249 - T_2) \rightarrow T_2 = 236 \text{ } ^\circ C$$

1.2.3 Tramo Filtro-Chimenea

Las condiciones de entrada son:

- Q_{CR} : 4,92 m³/s
- T_2 : 236 °C
- T_{PF} : 51,2° C

El procedimiento es similar al utilizado en el apartado 1.1.3 de Anexos:

Coefficiente de convección interior:

$$h_{ci} = (3,76 - 0,00497 \cdot 236) \cdot \frac{22,23^{0,8}}{0,531^{0,2}} = 35,10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de convección exterior:

$$h_{ce} = 1,17 \cdot \sqrt[4]{\frac{(51,2 - 27)}{0,683}} = 2,85 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de radiación:

$$h_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot (324,2 + 300) \cdot (324,2^2 + 300^2) = 5,52 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente global de transferencia de calor:

$$U_{F-C} = \frac{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,531}{2}} \cdot 34,96 + \frac{\ln\left(\frac{0,603}{\frac{2}{0,531}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 40} + \frac{\ln\left(\frac{0,683}{\frac{2}{0,603}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,038} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2} \cdot (2,85 + 5,52)}} = 0,78 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Flujo de calor:

$$q_{F-C} = 0,78 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,683}{2} \cdot (236 - 27) \cdot 6,8 = 2.378,6 W$$

Temperatura final de la chimenea:

$$2.378,59 = 2,64 \cdot 1,295 \cdot 1100 \cdot (236 - T_3) \rightarrow T_3 = 235 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Caudal de salida al final del tramo:

$$Q_s = 9.500 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{273 + 235}{273} = 17.677 \frac{m^3}{h}$$

1.2.4 Pérdidas de calor totales

$$q_{total} = q_{A-F} + q_F + q_{F-C} = 55.315W = q_{teórica}$$

1.2.5 Pérdidas de calor no cuantificables

Se ha llegado a la conclusión de que con el balance teórico de energía no se recogen todas las pérdidas de calor del sistema. Por ello, se le aplica un factor de corrección del 10%, calculado en el apartado 1.1.5 de Anexos.

$$q_{real} = q_{total} + 0,1 \cdot q_{total} = 60.847W$$

1.2.6 Cálculo de la dilución

Como la temperatura de salida de la chimenea es mayor a la permisible por el ventilador (200°C), se debe realizar una dilución.

El balance de energía correspondiente es el siguiente:

$$Q_3 \cdot C_{p3} \cdot \rho_3 \cdot T_3 + Q_d \cdot C_{pd} \cdot T_d \cdot \rho_d = (Q_3 \cdot \rho_3 + Q_d \cdot \rho_d) \cdot C_{pc} \cdot T_c$$

$$17.677 \cdot 1,105 \cdot 235 \cdot 0,702 + Q_d \cdot 1,012 \cdot 21 \cdot 1,2 = (17.677 \cdot 0,702 + Q_d \cdot 1,2) \cdot 1,095 \cdot 190$$

$$Q_d = 2.858 \frac{m^3}{h} = 2.654 \frac{Nm^3}{h}$$

Por lo que el caudal de salida total por la chimenea es aproximadamente 20.613 m³/h.

2. Balance de materia

2.1 Rendimiento del sistema de depuración

Para calcular el rendimiento del sistema de depuración se recogen los valores de la concentración en la chimenea antes y después de la instalación del sistema de depuración (apartado 5 de la Memoria).

La concentración antes del sistema de depuración se toma como concentración inicial y la de después de instalación, como concentración final:

- C_0 : 40,2 mg/m³ (18% O₂)
- C_f : 5,3 mg/m³ (18% O₂)

Así pues, el rendimiento del sistema de depuración viene dado por:

$$\text{Rendimiento} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 = \frac{40,2 - 5,3}{40,2} = 86,81 \% \approx 87\%$$

Se calcula la concentración de salida suponiendo la concentración media de 25 mg/m³:

$$S = 25 \cdot 10^{-6} - 0,87 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \rightarrow S = 3,25 \cdot 10^{-6} \frac{mg}{Nm^3}$$

Se pasan los caudales volumétricos a caudales másicos:

$$m_0 = 25 \cdot 10^{-6} \frac{mg}{Nm^3} \cdot 9500 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{21 - 15}{21 - 18} = 0,475 \frac{kg}{h}$$

$$m_f = 3,25 \cdot 10^{-6} \frac{mg}{Nm^3} \cdot 9500 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{21 - 15}{21 - 18} = 0,062 \frac{kg}{h}$$

$$m_A = 0,87 \cdot 25 \cdot 10^{-6} \frac{mg}{Nm^3} \cdot 9500 \frac{Nm^3}{h} \cdot \frac{21 - 15}{21 - 18} = 0,413 \frac{kg}{h}$$

2.2 Tiempo de saturación

El tiempo de breakpoint permite estimar el tiempo de saturación de un lecho, es decir, el tiempo que se utiliza el lecho antes de sustituirlo por uno nuevo. Para ello se tienen los siguientes datos:

- $Q_{CN} = 9.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (15% O_2)
- $(x/m) = 0,3 \text{ kg HF/ kg Adsorbente}$
- $m_A = \text{kg de adsorbente en el lecho}$

Además de estos datos, es necesaria la concentración de entrada y de salida. Esta concentración se obtiene del apartado 5.1 de la Memoria.

Se ha tomado un valor de rendimiento del sistema del 87%.

- $C_0: 25 \text{ mg/m}^3$ (18% O_2)
- $C_f: 3,25 \text{ mg/m}^3$ (18% O_2)

Por otro lado, como se observa en el apartado 6.2.2 de la Memoria, la distribución del gas no es ideal, es decir, el gas no está en contacto con la totalidad de adsorbente en el interior del filtro. Esto supone una pérdida de rendimiento del sistema de depuración.

Se supone un 20 % de pérdida de rendimiento por distribución de aire no idónea.

$$t_b = \frac{\left(\frac{x}{m}\right) \cdot m_A}{Q \cdot (C_0 - C_f)} \cdot F = \frac{0,3 \cdot 10.000}{9500 \cdot \frac{21 - 15}{21 - 18} \cdot (C_0 - C_0 \cdot (1 - 0,87))} \cdot 0,8$$

$$t_b = \frac{0,1452}{C_0}$$

Siendo:

- x/m : La cantidad de contaminante que puede adsorber el adsorbente (kg contaminante/ kg adsorbente)
- m_A : Cantidad de adsorbente en el filtro (Kg)
- F : Factor de corrección de desaprovechamiento del lecho adsorbente

Con ello se construye la tabla 2-1, donde se obtiene la cantidad de filtros necesarios en un año de trabajo:

C_0 (mg/Nm ³)	t_b (h)	X (años/filtro)
12,5	11.616	1,52
25	5.808	0,76
50	2.904	0,38

Tabla 2-1. Tiempo de breakpoint

Tomando como régimen de trabajo 7.600h al año, el filtro, en las condiciones de trabajo de la empresa de estudio, tiene una duración de 0,76 años.

El comportamiento esperado del rendimiento del filtro se encuentra en el apartado 6.5.1 de la Memoria.

3. Cálculo de la pérdida de carga

En primer lugar, se realizan los cálculos pertinentes de la pérdida de carga de las conducciones:

3.1 Tramo 1

El esquema del tramo 1 es el siguiente (figura 2-1):

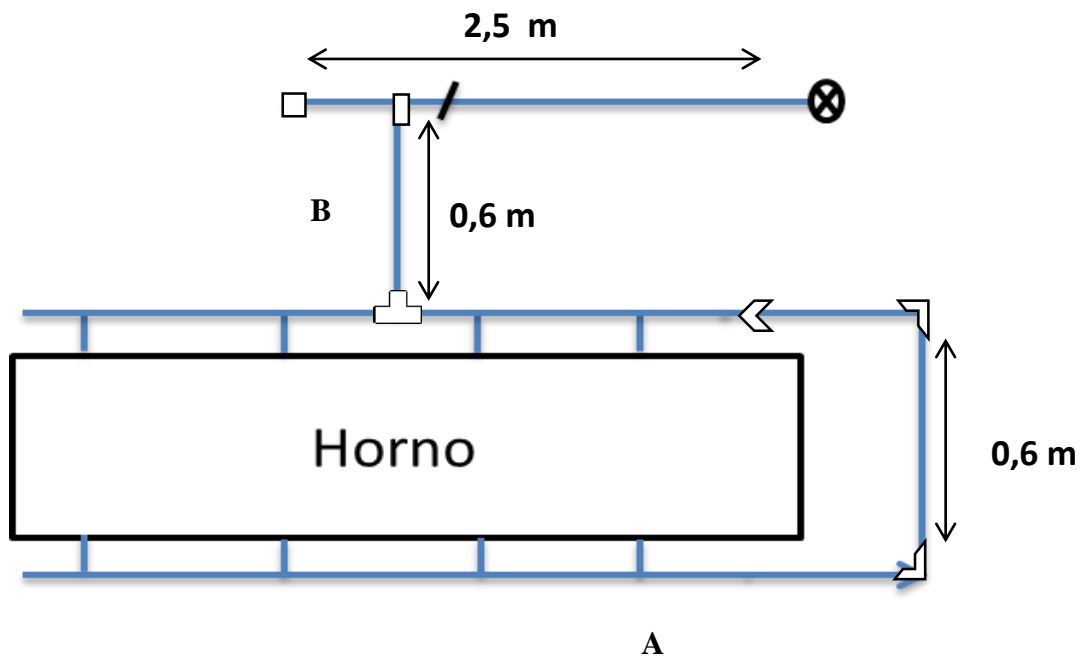


Figura 2-1. Esquema del tramo 1 (vista horizontal).

Desde una perspectiva superior el esquema sería el siguiente (figura 2-2):

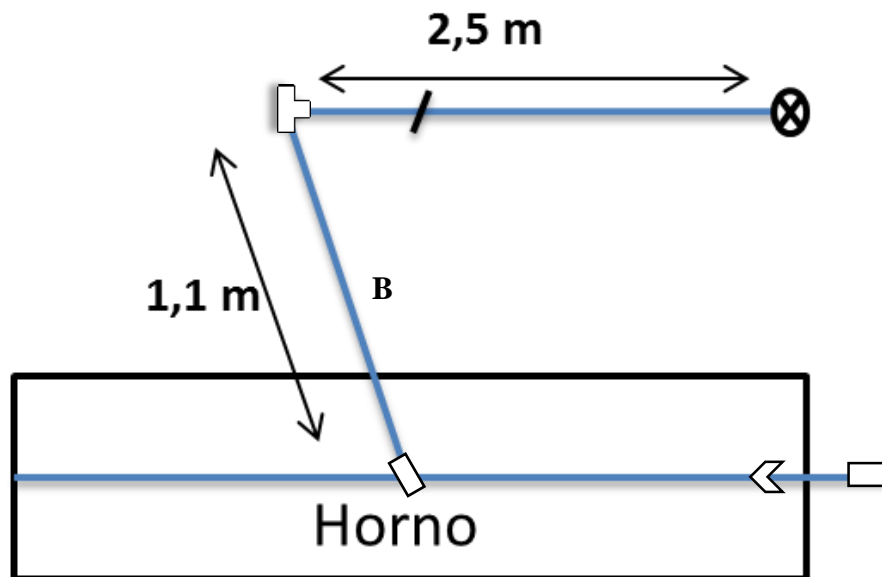


Figura 2-2. Esquema del tramo 1 (vista vertical).

En las figuras 2-1 y 2-2 se diferencian dos tramos, el tramo A y el tramo B. El tramo A recoge los gases de combustión de la parte inferior del horno cerámico y el tramo B son los gases de la corriente A, más los gases de combustión de la parte superior del horno (a partir del ensanchamiento). El tramo B finaliza en el manómetro que mide la pérdida de carga producida por el filtro.

Las características de estos tramos se calculan de la siguiente manera:

En primer lugar, se definen en la tabla 2-2 los caudales y velocidades de cada tramo. Para realizar el cálculo, se supone que el caudal de los humos del horno se divide uniformemente por las bocas de aspiración y que la temperatura es constante en todo el tramo:

Además, se tiene en cuenta que el área de una conducción es:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2$$

Y que la velocidad se puede calcular de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q_{CR}}{A} = \frac{4 \cdot Q_{CR}}{\pi \cdot D_i^2}$$

Siendo:

- A: Área (m)
- Q_{CR} : Caudal en las condiciones reales de operación (m³/s)

Como el caudal en las condiciones de operación no se encuentra en condiciones normales, se calcula el caudal real con la ecuación siguiente:

$$Q_{CR} = Q_{CN} \frac{T_{CR}}{T_{CN}}$$

Siendo:

- T_{CR} : Temperatura en condiciones reales de operación (K)
- T_{CN} : Temperatura en condiciones normales de operación (K)

Corriente	D_i (m)	Q_{CN} (Nm ³ /h)	Q_{CN} (Nm ³ /s)	$Q_{250^\circ C}$ (m ³ /s)	v (m/s)
A	0,360	4.750	1,32	2,52	24,84
B	0,531	9.500	2,64	5,04	22,83

Tabla 2-2. Caudales y velocidades de las corrientes del tramo 1

Las pérdidas de carga en una conducción se pueden calcular mediante la suma de la pérdida de carga en el tramo recto y la pérdida de carga producida por los accidentes:

$$\Delta P = \Delta P_{TR} + \Delta P_{ACC}$$

La pérdida de carga de los gases en un tramo recto viene dada por la ecuación:

$$\Delta P_{TR} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \rho$$

Siendo:

- **f**: Factor de fricción (gráfico Moody)
- **v**: Velocidad en la conducción (m/s)
- **L**: Longitud del tramo recto (m)
- **D**: Diámetro de la conducción (m)
- **ρ**: Densidad del gas (Kg/m³)
- **ΔP_{TR}**: Pérdida de carga en el tramo recto (Pa)

3.1.1 Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por el tramo recto

Se aplica la ecuación de la pérdida de carga. En esta ecuación es necesario el valor del factor de fricción, para ello se utiliza el gráfico de Moody (apartado 7 de Anexos). Este gráfico relaciona el número de Reynolds con la rugosidad relativa de la conducción, determinando así el factor de fricción.

El número de Reynolds se obtiene con la ecuación siguiente:

$$Re = \frac{v \cdot D_i \cdot \rho}{\mu}$$

Siendo:

- **μ**: Viscosidad del gas (Pa·s)
- **Re**: Número de Reynolds

Además del número de Reynolds es necesaria la rugosidad relativa de la conducción, la cual se obtiene de la relación siguiente:

$$Rugosidad\ relativa = \frac{\epsilon}{D}$$

Siendo:

- ϵ : Rugosidad de la conducción (Acero comercial $\epsilon = 0,00015$)

Con estos datos se construye la tabla 2-3:

Corriente	$\rho_{250^\circ\text{C}}$ (kg/m ³)	$\mu \cdot 10^6$ (Pa · s)	Re · 10 ⁵	ϵ / D_i	4f
A	0,682	26,3	2,13	0,00041	0,018
B	0,682	26,3	3,14	0,00028	0,016

Tabla 2-3. Cálculo del factor de fricción del tramo 1.

Una vez obtenido el factor de fricción se recopilan las variables de la ecuación en la tabla 2-4:

Corriente	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	f	L (m)	D _i (m)
A	24,84	0,682	0,0045	0,6	0,360
B	22,83	0,682	0,0040	4,2	0,531

Tabla 2-4. Variables de la ecuación de pérdida de carga del tramo 1.

Con todo ello se procede al cálculo de la pérdida de carga en el tramo recto de la corriente A y de la corriente B del tramo 1:

$$\Delta P_{TRA1} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho = 2 \cdot 0,0045 \cdot 24,84^2 \cdot \frac{0,60}{0,360} \cdot 0,682 = 6,31 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{TRB1} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho = 2 \cdot 0,0040 \cdot 22,83^2 \cdot \frac{4,2}{0,531} \cdot 0,682 = 22,49 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga en el tramo 1 debido al tramo recto es:

$$\Delta P_{TR1} = \Delta P_{TRA} + \Delta P_{TRB} = 6,31 + 22,49 = 28,80 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga ocasionada por el tramo recto en este tramo es prácticamente despreciable. Esto es debido a que la velocidad de circulación de los gases no es muy elevada, a la vez que el tramo recto es de una longitud corta.

3.1.2 Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por los accidentes

La pérdida de carga ocasionada por los accidentes viene dada por la ecuación siguiente:

$$\Delta P_{AC} = \sum K \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$$

Siendo:

- **K**: Constante producida por los accidentes
- **ΔP_{AC}** : Pérdida de carga producida por los accidentes (Pa)

La constante de los accidentes del tramo de la corriente A se recoge en la tabla 2-5:

Accidentes	Cantidad	K	ΣK
Codo de 90°	2	0,75	1,50
Boca redondeada	4	0,04	0,16
Ensanchamiento	1	0,30	0,30
		Total	3,44

Tabla 2-5. Constante K de los accidentes en el tramo de la corriente A.

Se aplica la ecuación de la pérdida de carga:

$$\Delta P_{ACA1} = 3,44 \cdot \frac{24,84^2}{2} \cdot 0,682 = 723,79 \text{ Pa}$$

Por otro lado, se recogen los datos de las constantes del tramo de la corriente B en la tabla 2-6:

Accidentes	Cantidad	K	ΣK
Codo de 90°	1	0,75	0,75
T Standard	2	1,00	2,00
Boca redondeada	4	0,04	0,16
Válvula de mariposa	1	0,24	0,24
Total			3,15

Tabla 2-6. Constante K de los accidentes en el tramo de la corriente B.

Con la ecuación siguiente, se obtiene la pérdida de carga de los accidentes en la corriente B:

$$\Delta P_{ACB1} = 3,15 \cdot \frac{22,83^2}{2} \cdot 0,682 = 559,85 \text{ Pa}$$

Por lo que:

$$\Delta P_{AC1} = \Delta P_{ACA} + \Delta P_{ACB} = 723,79 + 559,85 = 1.283,64 \text{ Pa}$$

Al realizar la suma entre la pérdida de carga producida por el tramo recto y la pérdida de carga producida por los accidentes, se obtiene la pérdida de carga en el tramo 1:

$$\Delta P_{T1} = \Delta P_{TR1} + \Delta P_{AC1} = 28,80 + 1283,64 = 1.312,44 \text{ Pa}$$

3.2 Tramo Filtro

El tramo Filtro viene dado por la figura 2-3:



Figura 2-3. Tramo Filtro (vista vertical).

La pérdida de carga de este tramo se calcula de forma experimental. Para ello se conecta un manómetro diferencial a la entrada y a la salida de gases del filtro.

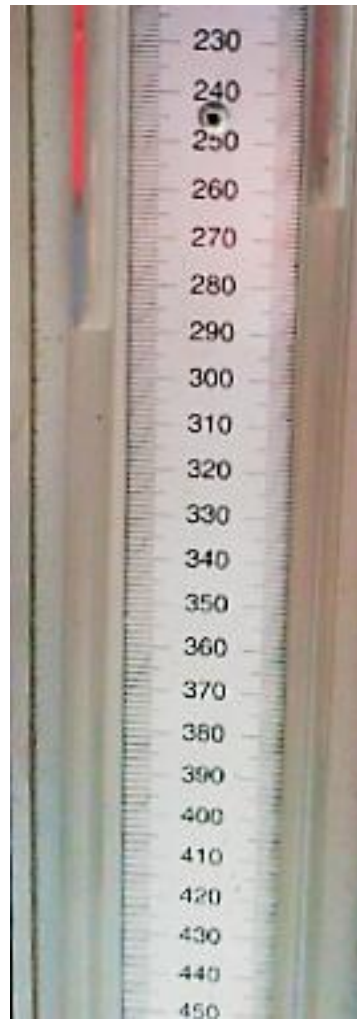


Imagen 2-1. Pérdida de carga producida por el filtro.

La pérdida de carga producida por el filtro es de 25 mmca:

$$\Delta P_{TF} = 25 \text{ mmca} \cdot \frac{9,81 \text{ Pa}}{1 \text{ mmca}} = 245,25 \text{ Pa}$$

3.3 Tramo 2

El esquema del tramo 2 es el siguiente (figura 2-4):

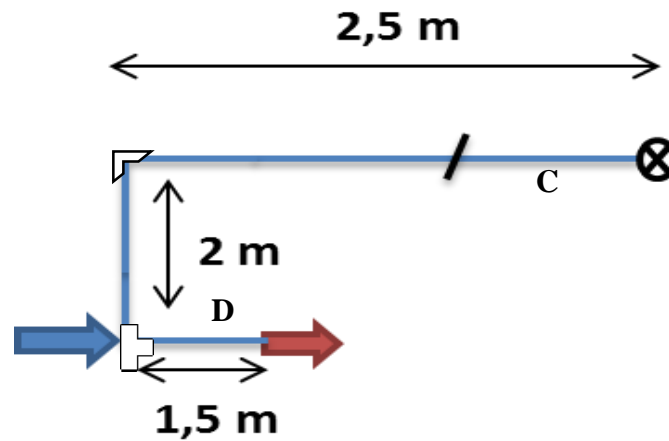


Figura 2-4. Esquema de las conducciones del tramo 2 (vista vertical).

El diámetro de las conducciones de la figura 2-4 es constante, sin embargo, existe una variación del caudal debido a la dilución. Existen dos corrientes, la corriente C y la corriente D. La corriente C es la procedente del filtro y la corriente D es la suma de la corriente C más la corriente de dilución.

3.3.1 Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por el tramo recto

Corriente	D_i (m)	Q_{CN} (Nm ³ /h)	Q_{CR} (Nm ³ /s)	v (m/s)
C	0,531	9.500	4,92	22,21
D	0,531	12.133	5,71	25,78

Tabla 2-7. Velocidad en el tramo 2.

Corriente	ρ (kg/m ³)	$\mu \cdot 10^6$ (Pa · s)	$Re \cdot 10^5$	ϵ / D_i	$4f$
C	0,701	25,8	3,20	0,00028	0,017
D	0,770	25,8	4,30	0,00028	0,017

Tabla 2-8. Cálculo del factor de fricción del tramo 2.

Una vez obtenido el factor de fracción, se recopilan las variables de la ecuación en la tabla 2-9:

Corriente	v (m/s)	ρ (kg/m ³)	f	L (m)	D _i (m)
C	22,21	0,701	0,00425	4,5	0,531
D	25,78	0,770	0,00425	1,5	0,531

Tabla 2-9. Variables de la ecuación del tramo 2.

Con todo ello se procede al cálculo de la pérdida de carga en el tramo recto de la corriente A y de la corriente B del tramo 1:

$$\Delta P_{TRC2} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho = 2 \cdot 0,00425 \cdot 22,21^2 \cdot \frac{4,5}{0,531} \cdot 0,701 = 24,91 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{TRD2} = 2 \cdot f \cdot v^2 \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho = 2 \cdot 0,00425 \cdot 25,78^2 \cdot \frac{1,5}{0,531} \cdot 0,769 = 12,28 \text{ Pa}$$

La pérdida de carga total producida por el tramo recto es:

$$\Delta P_{TR2} = 24,91 + 12,28 = 37,19 \text{ Pa}$$

3.3.2 Cálculo de la pérdida de carga ocasionada por los accidentes

Los accidentes existentes en el tramo 2 se encuentran en la tabla 2-5:

Accidentes	Cantidad	K	ΣK
T Standard	1	1,00	1,00
Codo de 90°	1	0,75	1,50
Válvula de mariposa (10°)	1	0,52	0,52
Entrada ligeramente redondeada	1	0,23	0,23
		Total	3,25

Figura 2-5. Accidentes tramo 2.

Como los accidentes se encuentran en la corriente C, la corriente D está exenta de pérdidas de cargas por accidentes:

$$\Delta P_{ACC2} = 3,25 \cdot \frac{22,21^2}{2} \cdot 0,701 = 561,91 \text{ Pa}$$

3.4 Pérdida de carga total

La pérdida de carga total en el sistema de depuración viene dada por la suma de las pérdidas de carga de los tres tramos:

$$\Delta P_T = \Delta P_{T1} + \Delta P_{TF} + \Delta P_{T2}$$

$$\Delta P_T = (28,8 + 1.312,44) + 245,25 + (37,19 + 561,91) = 2.185,6 \text{ Pa}$$

3.5 Potencia del ventilador

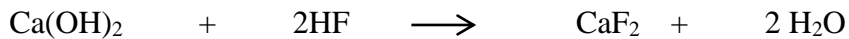
Una vez calculada la pérdida de carga del sistema se puede calcular la potencia necesaria del ventilador:

$$P(kW) = \frac{Q_{CR} \cdot \Delta P_T \cdot \rho_r \cdot 10^{-3}}{\eta} = \frac{20.613 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 2.185,6 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 10,7 \text{ kW}$$

4. Comparación filtro mangas-filtro adsorbente

4.1 Filtro de mangas

En primer lugar, se realiza el cálculo de los costes de operación de un sistema de filtro de mangas con reactivo (método más utilizado en la actualidad para la depuración de HF). El reactivo elegido para realizar el estudio es Ca(OH)_2 y la reacción que tiene lugar es la siguiente:



Para alcanzar el rendimiento requerido es necesario que el ratio de exceso sea $\text{Ca(OH)}_2/\text{HF}$ es 2.5.

Teniendo en cuenta que:



Y que los pesos moleculares (en kg/kmol) son:



4.1.1 Costes de la instalación

En primer lugar, se elige el tejido de la manga a utilizar siguiendo los siguientes criterios:

- Temperatura máxima de trabajo en continuo
- Coste de la malla filtrante
- Resistencia de la malla

Para ello, se seleccionan tres mallas de la bibliografía: el Nomex Arammídico, Nomex Teflonado y el Teflón.

Como la temperatura de trabajo del Nomex arammídico y el Nomex Teflonado es inferior a la del caudal de entrada se debe realizar una dilución (suponiendo los calores específicos constantes):

$$Q_3 = Q_1 \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{(T_3 - T_2)}$$

Siendo:

- Q_3 : Caudal total después de la dilución (Nm^3/s)
- Q_1 : Caudal en condiciones normales antes de la dilución (Nm^3/s)
- T_1 : Temperatura de la corriente antes de la dilución ($^{\circ}\text{C}$)
- T_2 : Temperatura del aire ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- T_3 : Temperatura deseada después de la dilución ($^{\circ}\text{C}$)

$$Q_3 = 9500 \cdot \frac{(250 - 25)}{(190 - 25)} = 12.954,54 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

Para el cálculo del área de filtración se toma un valor de velocidad de filtración medio de $1,3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$:

$$v_f = \frac{Q}{A_f} \rightarrow A_f = \frac{Q}{v_f}$$

Además, como los gases no se encuentran en condiciones normales, se debe calcular el caudal real. Así pues, en la tabla 2-10 se recoge el área de filtración para los tres tipos de mangas seleccionadas:

Manga	Q_{CN} (Nm^3/h)	T ($^{\circ}\text{C}$)	$Q_{\text{CR}}(\text{m}^3/\text{h})$	$Q_{\text{CR}} (\text{m}^3/\text{min})$	$A_f (\text{m}^2)$
Nomex arammídica	12.954,54	190	21.970,52	366,17	281,67
Nomex Teflonado	12.954,54	190	21.970,52	366,17	281,67
Teflón	9.500,00	250	18.199,63	303,32	233,32

Tabla 2-10. Cálculo del área de filtración del filtro de mangas.

Con el área filtrante calculada, se calcula el coste de las mangas según la tabla 2-11:

Manga	€/m ²	€
Nomex arammídica	48,19	13.517,28
Nomex Teflonado	70,00	19.716,90
Teflón	90,36	21.082,79

Tabla 2-11. Coste mangas.

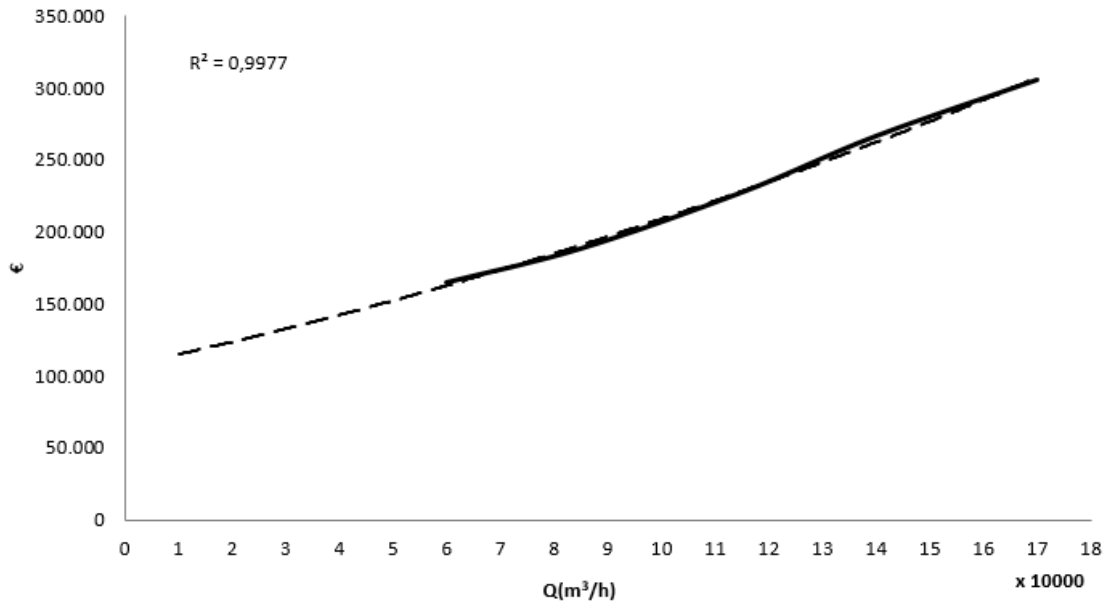
Como se observa en la diferencia de precio, es más rentable seleccionar una manga de Nomex arammídica (con dilución) que utilizar Teflón (sin dilución) o Nomex Teflonado. Sin embargo, se escoge Nomex Teflonado debido a su mayor durabilidad.

El coste de la infraestructura comprende la estructura metálica que rodea las mangas y el ventilador adicional necesario. Este precio viene dado por la tabla 2-12. La tabla muestra el precio de inversión en infraestructura en 1998, sin embargo, como el precio del dinero cambia año a año, se realiza una corrección aproximada aplicando que la variación entre el año 1998 y 2016 es del 30% (verificado con ingenierías especializadas).

Q _{CR} (m ³ /h)	60.000	85.000	115.000	140.000	170.000
Infraestructura (€,1998)	126.500	144.578	174.698	204.819	234.939
Infraestructura (€,2016)	164.450	187.951	227.107	266.265	305.421

Tabla 2-12. Coste de la infraestructura de la instalación de un filtro de mangas. (Libro “*Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guía técnica*. Instituto de tecnología cerámica, 1998”)

Como el caudal de estudio no se aproxima a ninguno de la tabla 2-12, se realiza una regresión a una ecuación polinómica:



Gráfica 2-1. Coste infraestructura para mangas de Nomex arammídica frente a caudal.

$$\text{Coste Infraestructura} = 2,23 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{CR}^2 + 0,80 \cdot Q_{CR} + 107.000$$

Así pues, el coste producido por la infraestructura es:

$$\text{Coste Infraestructura} = 2,23 \cdot 10^{-6} \cdot 21.970,52^2 + 0,80 \cdot 21.970,52 + 107.000€$$

$$\text{Coste Infraestructura} = 125.652,8€$$

Este precio corresponde únicamente a la instalación del filtro de mangas. Además, se debe tener en cuenta que las conducciones a instalar no están incluidas en este precio, ni la instalación de un aislamiento.

Así pues, se le añade un coste de 5000 € de aislamiento y se aproxima que el coste de las conducciones es similar al del filtro de adsorción (punto 1 de Presupuesto).

$$\text{Coste Infraestructura} = 125.652,8€ + 5.000€ + 34.980,41 € = 165.633,21 €$$

Suponiendo una amortización a 10 años, el coste anual por la instalación es de 16.563,32 €.

4.1.2 Costes de operación

En primer lugar, como las mangas tienen una vida útil de aproximadamente año y medio, se calcula el coste por cambio de mangas:

$$\text{Coste mangas anual} = \frac{19.716,90 \text{ €}}{1,5 \text{ años}} = 13.144,60 \text{ €}$$

La cantidad de reactivo necesario se calcula de la siguiente manera:

Suponiendo que la reacción tiene lugar de forma estequiométrica se obtiene un gasto de hidróxido cálcico de:

$$\frac{1 \text{ kmol } A_1}{2 \text{ kmol } A_2} = \frac{1 \text{ kmol } A_1 \cdot 74 \frac{\text{kg } A_1}{\text{kmol } A_1}}{2 \text{ kmol } A_2 \cdot 20 \frac{\text{kg } A_2}{\text{kmol } A_2}} = 1,85 \frac{\text{kg } A_1}{\text{kg } A_2}$$

Aplicando el ratio real de hidróxido cálcico / ácido fluorhídrico, se obtiene:

$$1,85 \frac{\text{kg } A_1}{\text{kg } A_2} \cdot 2,5 = 4,63 \frac{\text{kg } A_1}{\text{kg } A_2}$$

El caudal de humos aproximado es $Q_{CN} = 9.500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (al 15% de oxígeno), con una concentración inicial de ácido fluorhídrico media de $35 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. La cantidad de flúor a depurar en un año (utilizando el mismo rendimiento que en el filtro de adsorción) es:

$$\begin{aligned} & 9.500 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{(21 - 15)}{(21 - 18)} \cdot 7.600 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot (C_0 - C_0 \cdot 0,13) \frac{\text{mg } A_2}{\text{Nm}^3} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \\ & = 125,63 \cdot C_0 \frac{\text{kg } A_2}{\text{año}} \end{aligned}$$

Con la relación obtenida en los puntos anteriores se tiene que la cantidad de reactivo a utilizar es:

$$125,63 \cdot C_0 \frac{kg A_2}{año} \cdot 4,63 \frac{kg A_1}{kg A_2} = 581,66 \cdot C_0 \frac{kg A_1}{año}$$

Por otro lado, la cantidad de residuo generado viene dado por A₃:

$$581,66 \cdot C_0 \frac{kg A_1}{año} \cdot \frac{1}{74} \frac{kmol A_1}{kg A_1} \cdot \frac{1}{1} \frac{kmol A_3}{kmol A_1} \cdot 78 \frac{kg A_3}{kmol A_3} = 613,10 \cdot C_0 \frac{kg A_3}{año}$$

Suponiendo un precio aproximado de reactivo de 0,25 €/ kg A₁ (suministro y retirada incluido) y un coste de tratamiento de residuo (A₃) de 0,21 €/ kg A₃ se obtiene el coste de reactivo y de tratamiento de residuo al año:

$$\text{Coste de reactivo} = 581,66 \cdot C_0 \frac{kg A_1}{año} \cdot 0,25 \frac{€}{kg} = 145,42 \cdot C_0 \frac{€}{año}$$

$$\text{Coste de residuo} = 613,10 \cdot C_0 \frac{kg A_3}{año} \cdot 0,3 \frac{€}{kg} = 183,93 \cdot C_0 \frac{€}{año}$$

Además de los costes de reactivo y tratamiento de residuo, existen costes asociados al gasto de energía (ventilador del equipo de filtración y gasto de aire comprimido).

Para realizar la estimación del coste de operación se ha estimado una pérdida de carga de 150 mmca. Se calcula la potencia necesaria del ventilador adicional:

$$P(kW) = \frac{Q_{CR} \cdot \Delta P \cdot \rho_r \cdot 10^{-3}}{\eta}$$

Siendo:

- η : Rendimiento eléctrico del ventilador (se supone un 70%).

Por lo que:

$$P = \frac{20.613 \cdot \frac{1}{3600} \cdot 150 \cdot 9,81 \cdot 0.6 \cdot 10^{-3}}{0,7} = 7,22 \text{ kW}$$

Se selecciona un ventilador centrífugo de 12 kW para que no existan problemas en el arranque. Además, como los ventiladores instalados no tienen variador de frecuencia, la potencia consumida es la potencia marcada en el ventilador.

Además de este gasto, se supone un gasto de energía de aire comprimido para la limpieza a chorro de 5 kW.

$$(30 \text{ kW} + 12 \text{ kW} + 5 \text{ kW}) \cdot P \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 7600 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 357.200 \cdot P \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Por último, se le añade a los costes de operación el precio del mantenimiento anual (correctivo, preventivo y predictivo), estimado en unos 3.000€ por año.

$$\text{Coste OP.} = 357.200 \cdot P \text{€} + 3.000 \text{ €} + 13.144,60 \text{€} + 145,42 \cdot C_0 \text{€} + 183,93 \cdot C_0 \text{€}$$

4.1.3 Coste total

El coste total anual producido por la instalación del filtro de mangas es la suma de los costes de operación y los costes de instalación:

$$\text{Coste Total} = \text{Coste Instalación} + \text{Coste Operación}$$

$$\text{Coste Total} = 16.563 \frac{\text{€}}{\text{año}} + (357.200 \cdot P + 3.000 + 13.144,6 + 145,42 \cdot C_0 + 183,93 \cdot C_0) \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

C ₀ (mg/Nm ³)	C.O. (€/año)	C.T. [0.10 €/kWh] (€/año)	C.T. [0.15 €/kWh] (€/año)	C.T. [0.20 €/kWh] (€/año)
5	53.511	70.074	87.934	105.794
10	55.158	71.721	89.581	107.441
15	56.805	73.368	91.228	109.088
20	58.452	75.015	92.875	110.735
25	60.098	76.661	94.521	112.381
30	61.745	78.308	96.168	114.028
35	63.392	79.955	97.815	115.675
40	65.039	81.602	99.462	117.322
45	66.685	83.248	101.108	118.968
50	68.332	84.895	102.755	120.615

Tabla 2-13. Coste de operación y total del filtro de mangas.

4.2 Filtro adsorbente

4.2.1 Coste de instalación

El coste de la instalación viene dado por el coste de la instalación de las conducciones (punto 1 del Presupuesto). Se supone una amortización a 10 años:

$$\text{Coste de instalación} = \frac{34.980,41 \text{ €}}{10 \text{ años}} = 3.498,04 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

4.2.2 Coste de operación

El coste de operación es el gasto por año del sistema de depuración.

La potencia del ventilador necesario es de 17,8 kW, pero como no se encuentra instalado un variador de frecuencia se toma un valor de potencia del ventilador de 30 kW. Con ello se calcula el coste anual eléctrico:

$$(30 \text{ kW}) \cdot P \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 7600 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 228.000 \cdot P \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

El tiempo de duración del filtro se obtiene del apartado 2.2 de Anexos:

$$\text{Coste de operación} = 32 \frac{\text{€}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}} + 25.600 \frac{\text{€}}{\text{filtro}} \cdot \frac{1 \text{ filtro}}{X \text{ año}} + 228.000 \cdot P \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

4.2.3 Coste Total

$$\text{Coste total} = 3.498 \frac{\text{€}}{\text{año}} + 228.000 \cdot P \frac{\text{€}}{\text{año}} + 25.600 \frac{\text{€}}{\text{filtro}} \cdot \frac{1 \text{ filtros}}{X \text{ año}} + 32 \frac{\text{€}}{\text{día}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}}$$

C₀ (mg/Nm³)	t_b (h)	X (filtro/año)	C.O. (€/año)
5	29.040,00	0,26	41.180
10	14.520,00	0,52	47.879
15	9.680,00	0,79	54.579
20	7.260,00	1,05	61.279
25	5.808,00	1,31	67.979
30	4.840,00	1,57	74.678
35	4.148,57	1,83	81.378
40	3.630,00	2,09	88.078
45	3.226,67	2,36	94.778
50	2.904,00	2,62	101.477

Tabla 2-14. Coste operación del filtro de adsorción

C₀ (mg/Nm³)	C.T. [0.10 €/kWh] (€/año)	C.T. [0.15 €/kWh] (€/año)	C.T. [0.20 €/kWh] (€/año)
5	44.678	56.078	67.478
10	51.377	62.777	74.177
15	58.077	69.477	80.877
20	64.777	76.177	87.577
25	71.477	82.877	94.277
30	78.176	89.576	100.976
35	84.876	96.276	107.676
40	91.576	102.976	114.376
45	98.276	109.676	121.076
50	104.975	116.375	127.775

Tabla 2-15. Coste Total del filtro de adsorción.

5. Estudio básico de seguridad

Una de las obligaciones de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995) es la evaluación periódica de los riesgos en los puestos de trabajo.

Considerando que el sistema de depuración es una modificación del puesto de trabajo, se debe realizar una nueva evaluación.

En esta evaluación se identifican:

- Posibles riesgos.
- Causas que producen los riesgos.
- Consecuencias que podrían llegar a causar los riesgos.
- Medidas correctoras para eliminar el riesgo o disminuir su impacto.

Para analizar los riesgos se ha aplicado la metodología del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT):

En primer lugar, se procede a realizar una identificación de los posibles riesgos o problemas de seguridad que pueda ocasionar el sistema de depuración:

- Código 01: Caída de personas a distinto nivel.
 - No existe un acceso específico a la parte superior del filtro, se debe saltar de la plataforma del ventilador del horno.
- Código 07: Choques y golpes contra objetos inmóviles.
 - Movimiento de carretillas elevadoras alrededor del filtro.
 - Ausencia de un vallado que impida el contacto directo con el filtro.
- Código 14: Exposición a temperaturas ambientales extremas.
 - Como el sistema de depuración no está aislado, la radiación calorífica que emite produce un aumento elevado de la temperatura ambiental

alrededor del mismo. Este efecto está aumentado por la proximidad del horno con el sistema de depuración.

- Código 15: Contactos térmicos.
 - La superficie del sistema de depuración tiene una temperatura superior a los 60°C recomendados por el INSHT. Esto puede producir quemaduras graves por contacto directo.

- Código 22: Otros riesgos no especificados.
 - Debido a que el horno está aproximadamente a dos metros del filtro, la operación de cambio de rodillos puede ser peligrosa. El operario no tiene espacio suficiente para poder sacar completamente el rodillo, por esta razón, el operario debe partir el rodillo en trozos (peligro de proyección de fragmentos a alta temperatura). Además, si el operario tuviera una caída accidental a la hora de realizar la operación, podría estar en contacto directo con la superficie del filtro.



Imagen 2-2. Distancia entre el horno y el filtro.

En segundo lugar, se procede a realizar una valoración de los riesgos anteriores. Para ello se valoran los riesgos según la probabilidad de que ocurran según:

- Poco probable
- Probable
- Casi seguro

Y según la gravedad de la consecuencia:

- Leve
- Importante
- Serio

Con ello se calcula el índice de tolerabilidad con la tabla 2-16:

	Leve	Importante	Serio
Poco posible	0	1	2
Posible	1	2	3
Casi seguro	2	3	4

Tabla 2-16. Índice de tolerabilidad.

Siguiendo la tabla 2-16, se realiza la valoración de los riesgos del sistema de depuración en la tabla 2-17:

Código	Consecuencia	Probabilidad	Tolerabilidad
01	Importante	Poco probable	1
07	Importante	Probable	2
14	Importante	Casi seguro	3
15	Importante	Poco probable	1
22	Seria	Posible	3

Tabla 2-17. Tolerabilidad de riesgos producidos por el sistema de depuración

El criterio para la decisión de las medidas a aplicar es el siguiente:

- **Tolerabilidad 0:** No requiere acción específica.
- **Tolerabilidad 1:** Se debe considerar una solución rentable o sin una carga económica importante. Se requiere comprobación periódica.
- **Tolerabilidad 2:** Se debe realizar una inversión para minimizar el riesgo.
- **Tolerabilidad 3:** El problema debe remediarse en un tiempo de actuación corto.
- **Tolerabilidad 4:** No debe comenzarse ni continuarse el trabajo hasta que se reduzca el riesgo.

Código	Tolerabilidad	Acciones
01	1	Instalación de una escalera para el acceso a la parte superior del filtro.
07	2	Instalación de un vallado de seguridad.
14	3	Instalación de una capa de aislante alrededor del filtro.
15	1	Instalación de una capa de aislante alrededor del filtro.
22	3	Aumentar distancia de separación entre el filtro y el horno.

Tabla 2-18. Acciones correctoras.

6. Anexo de imágenes térmicas

6.1 Sin aislamiento

6.1.1 Pared 1

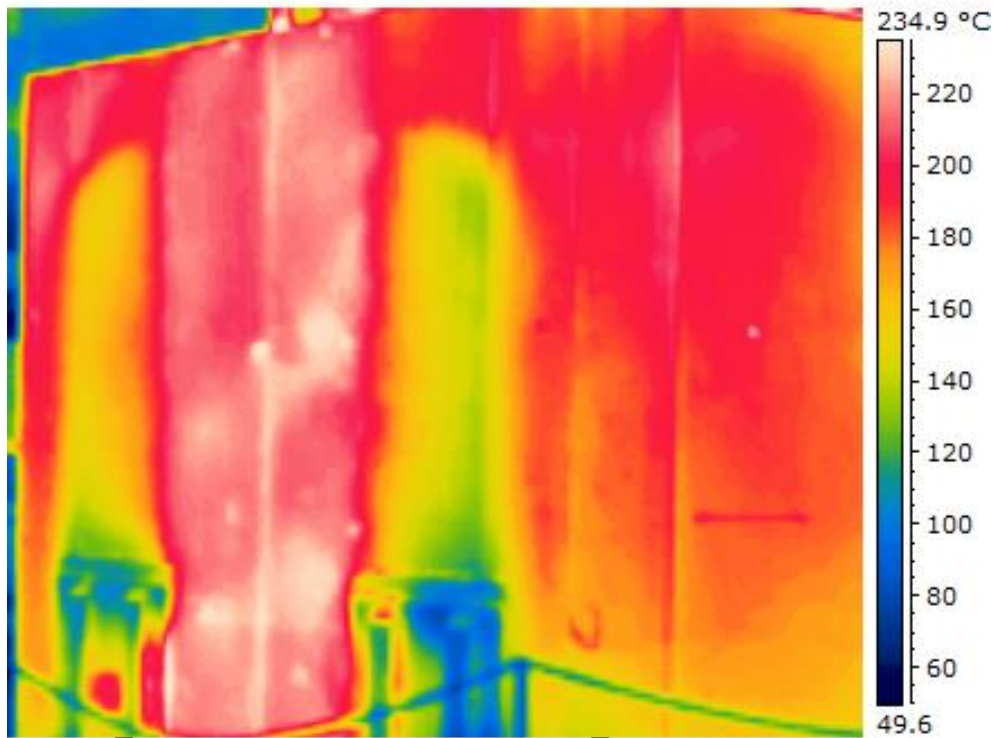


Imagen 2-3. Foto térmica pared 1.

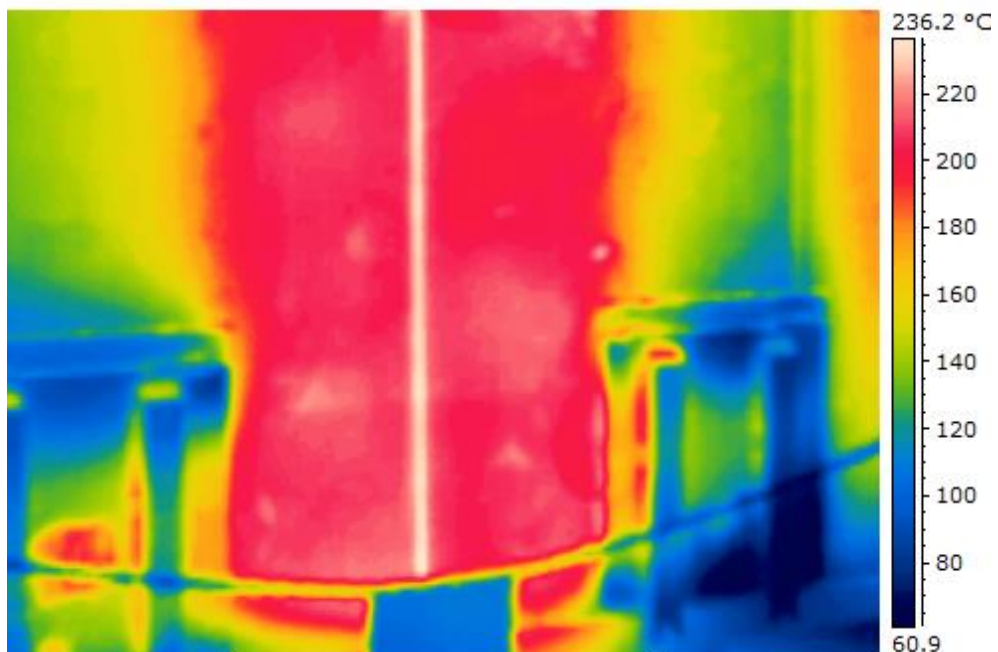


Imagen 2-4. Foto térmica pared 1.

6.1.2 Pared 2

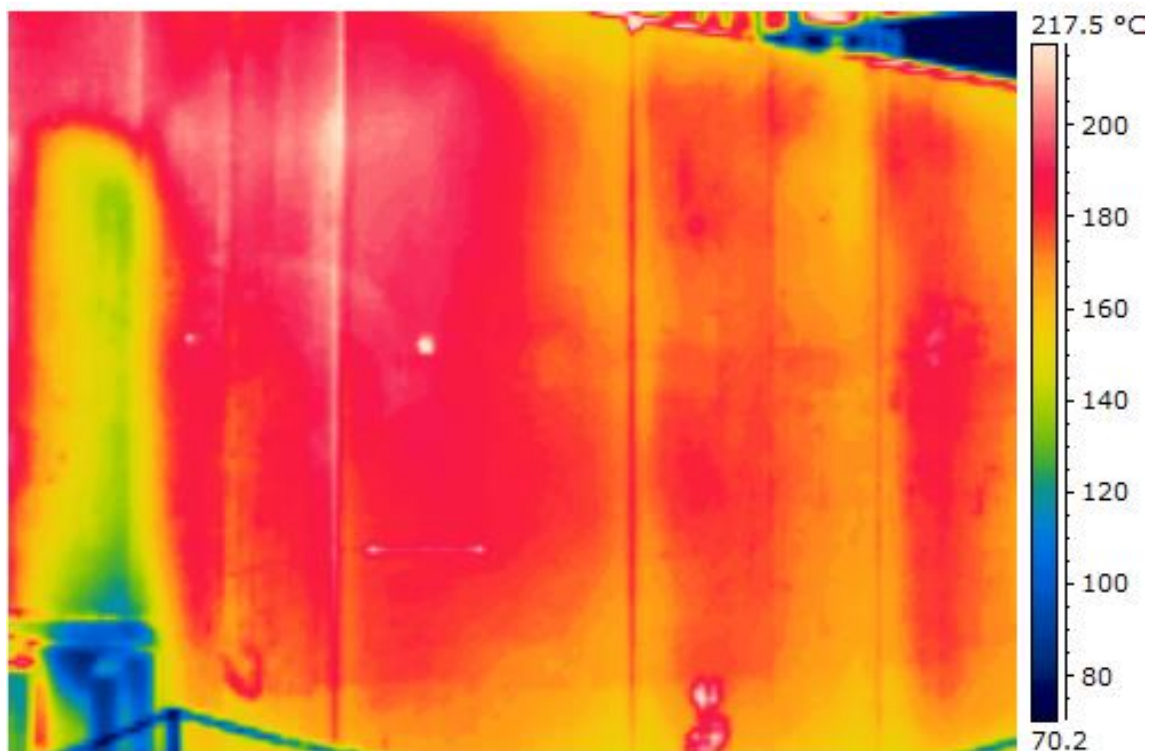


Imagen 2-5. Foto térmica pared 2.

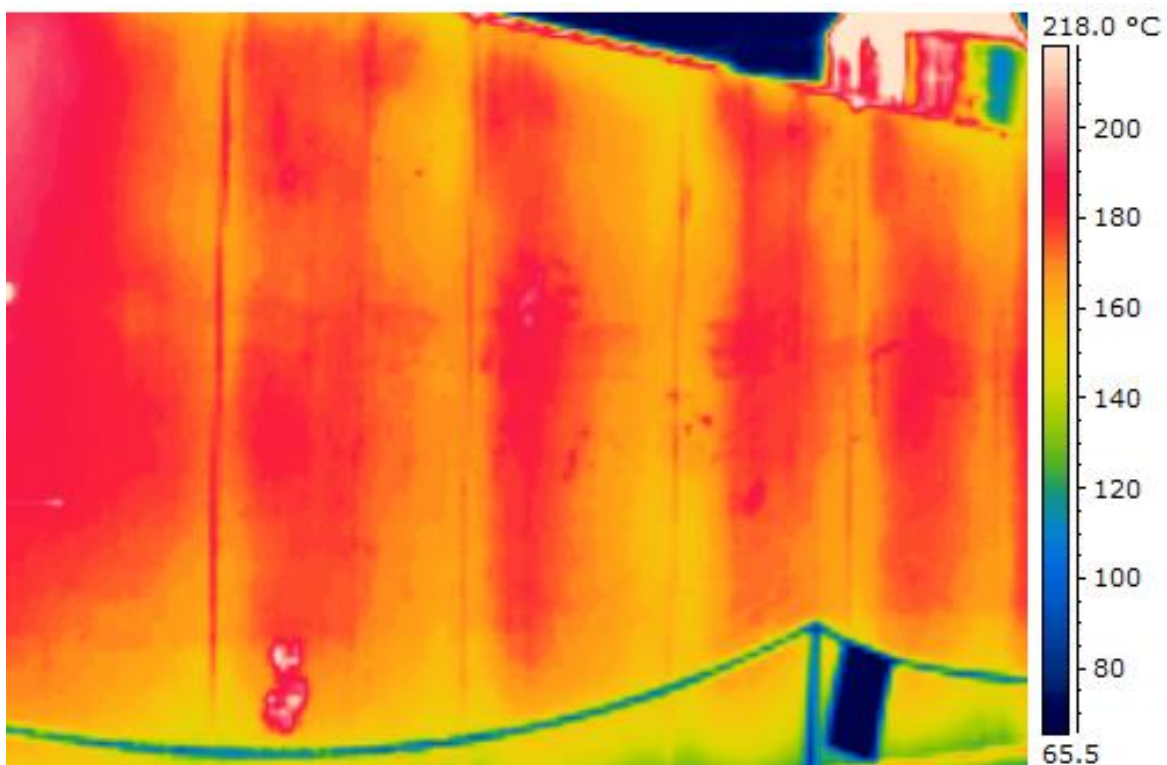


Imagen 2-6. Foto térmica pared 2.

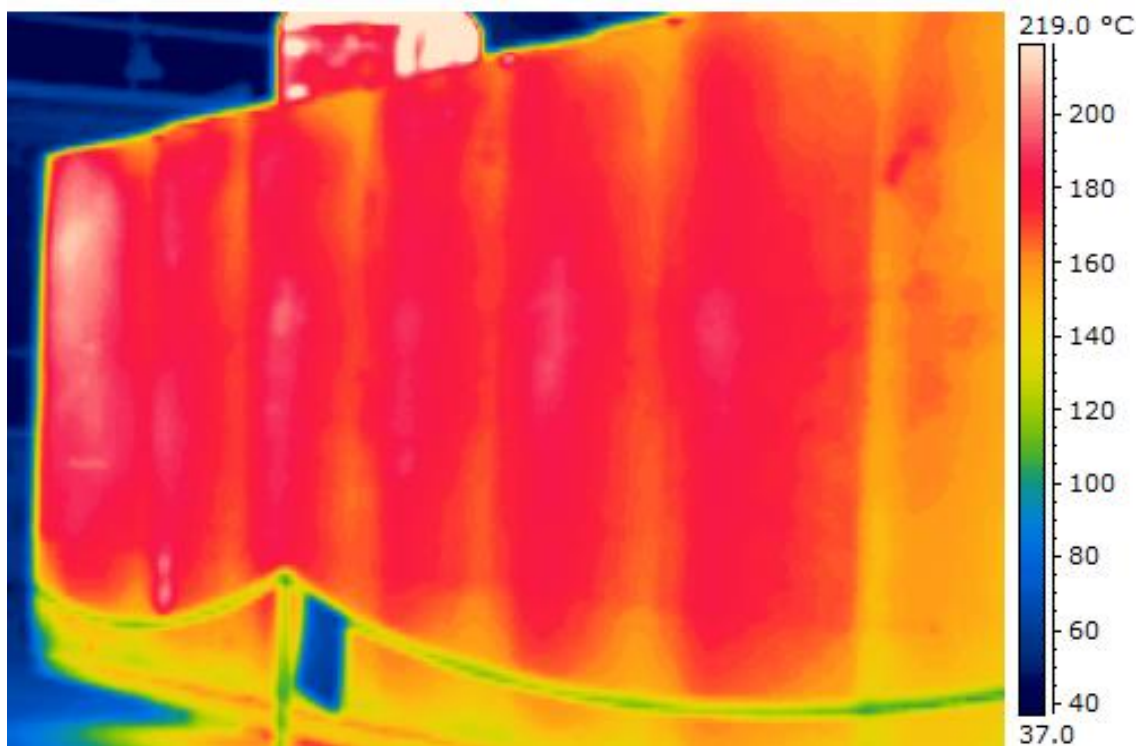


Imagen 2-7. Foto térmica pared 2.

6.1.3 Pared 3

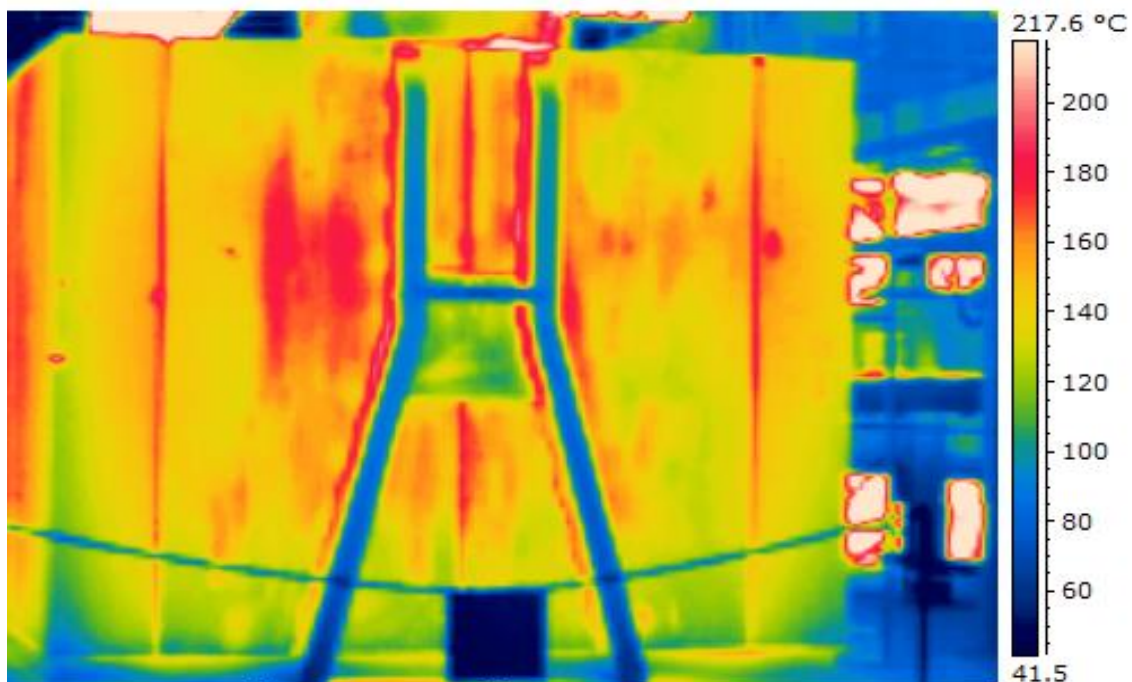


Imagen 2-8. Foto térmica pared 3.

6.1.4 Pared 4

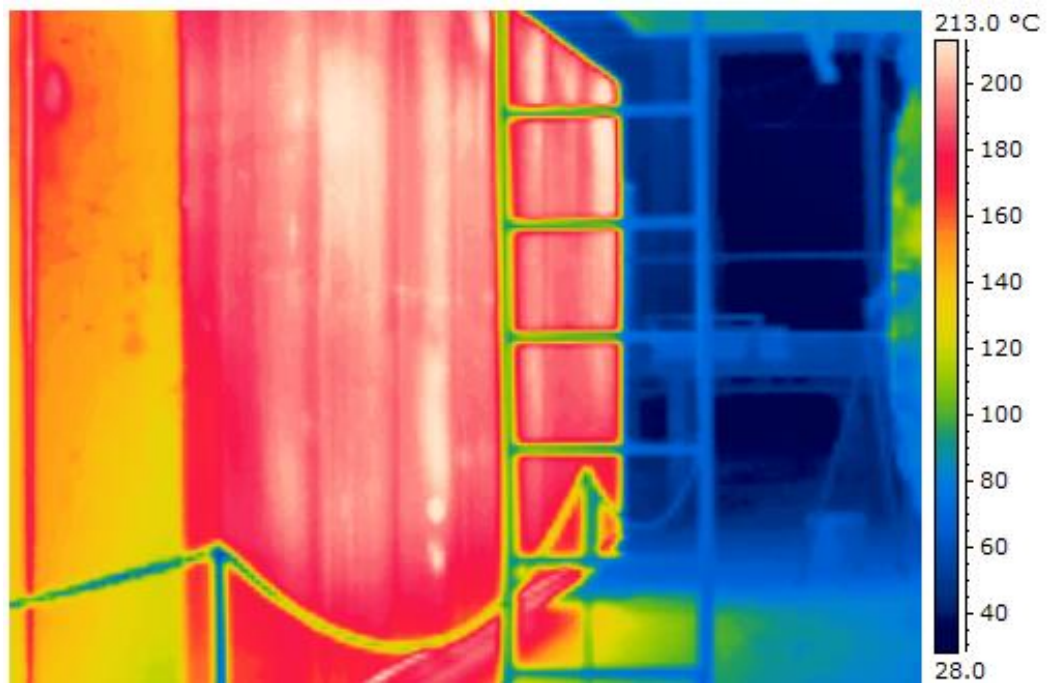


Imagen 2-9. Foto térmica pared 4.

6.1.5 Techo

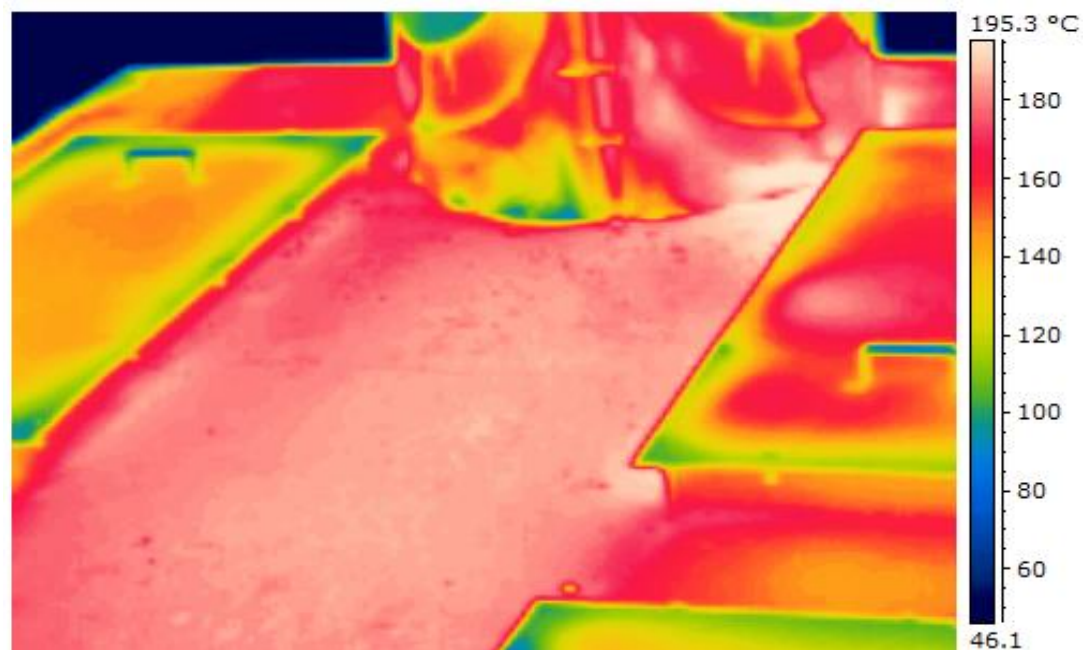


Imagen 2-10. Foto térmica techo.

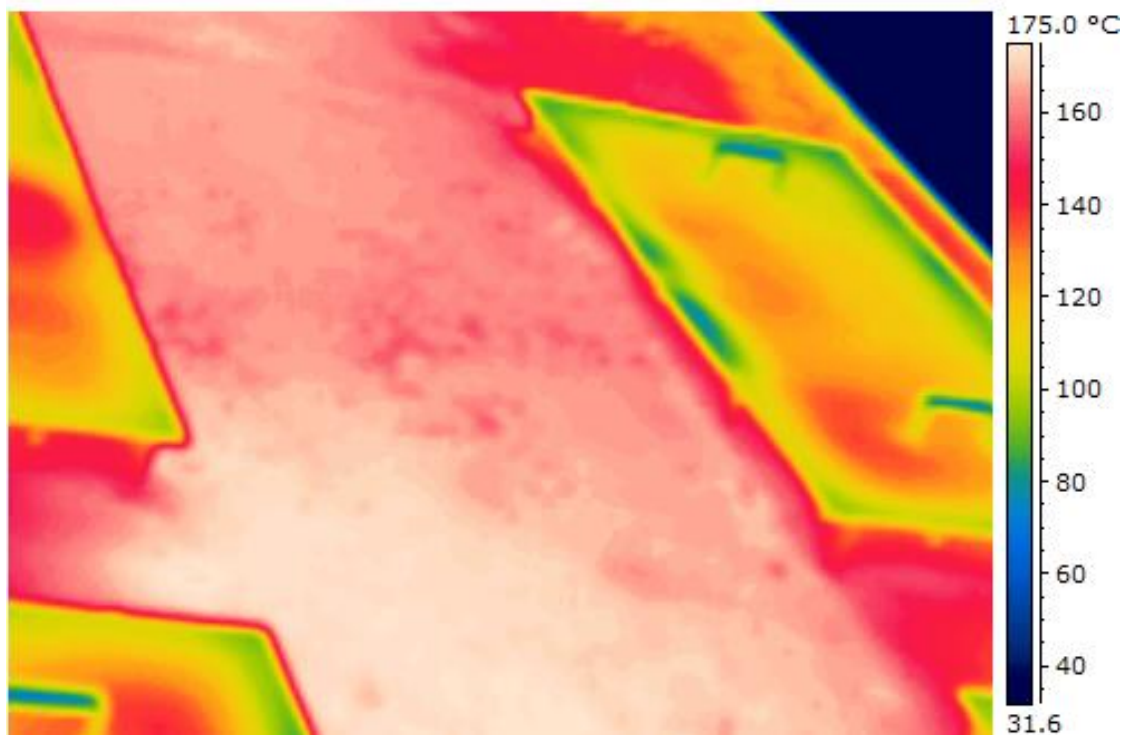


Imagen 2-11. Foto térmica techo.

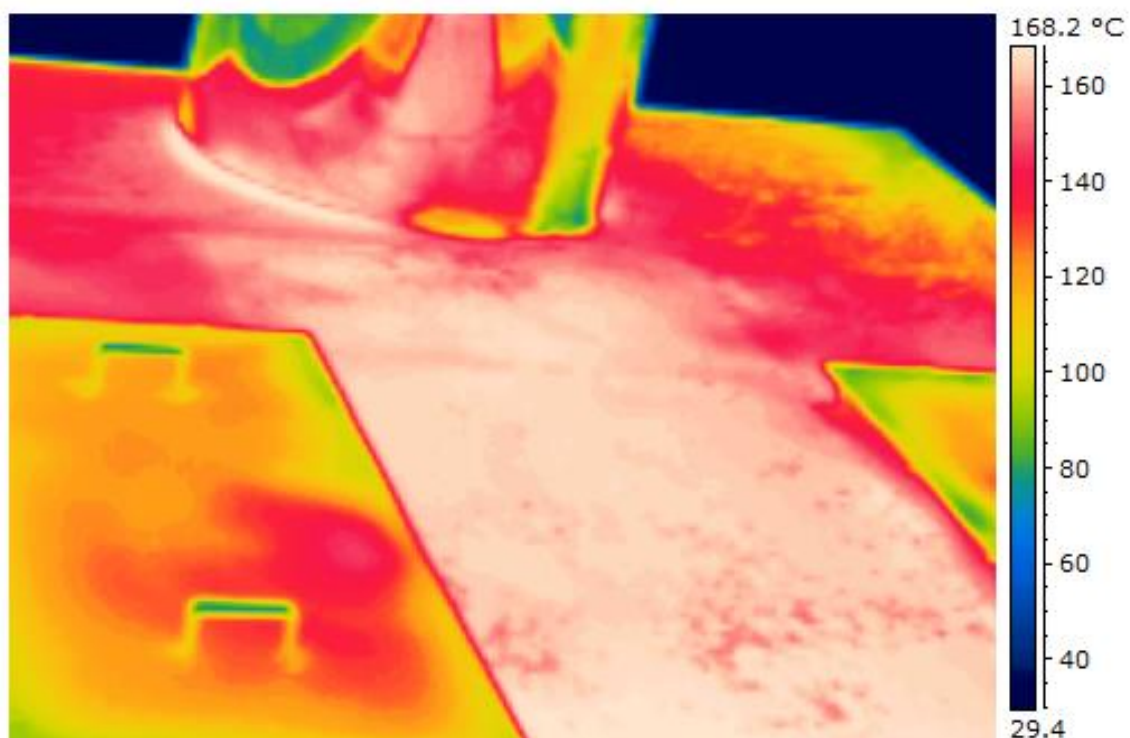


Imagen 2-12. Foto térmica techo.

6.2 Con aislamiento

6.2.1 Pared 1

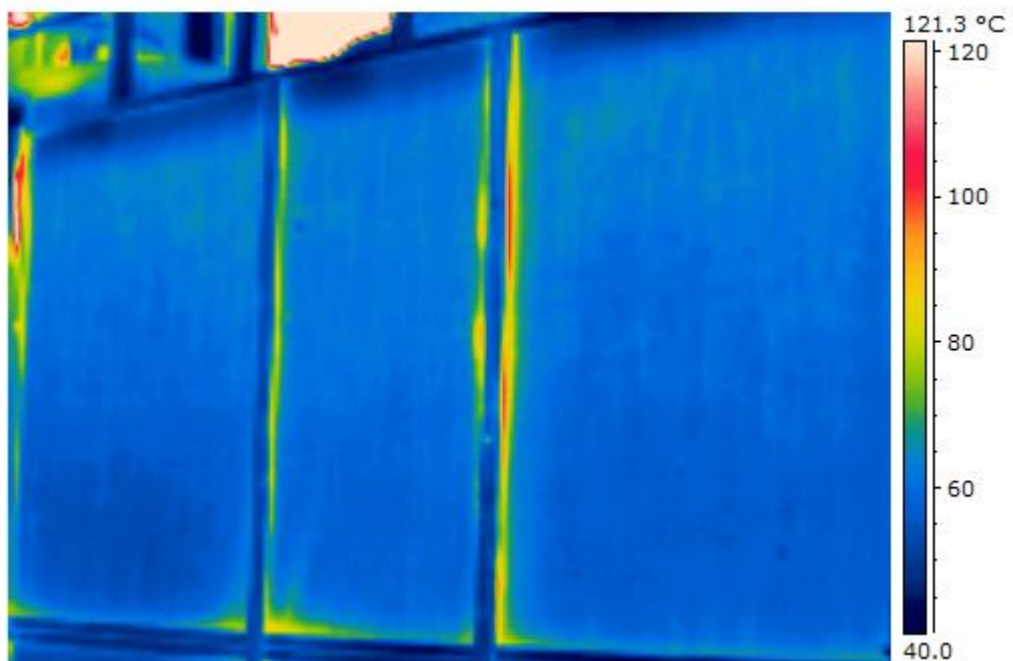


Imagen 2-13. Foto térmica pared 1

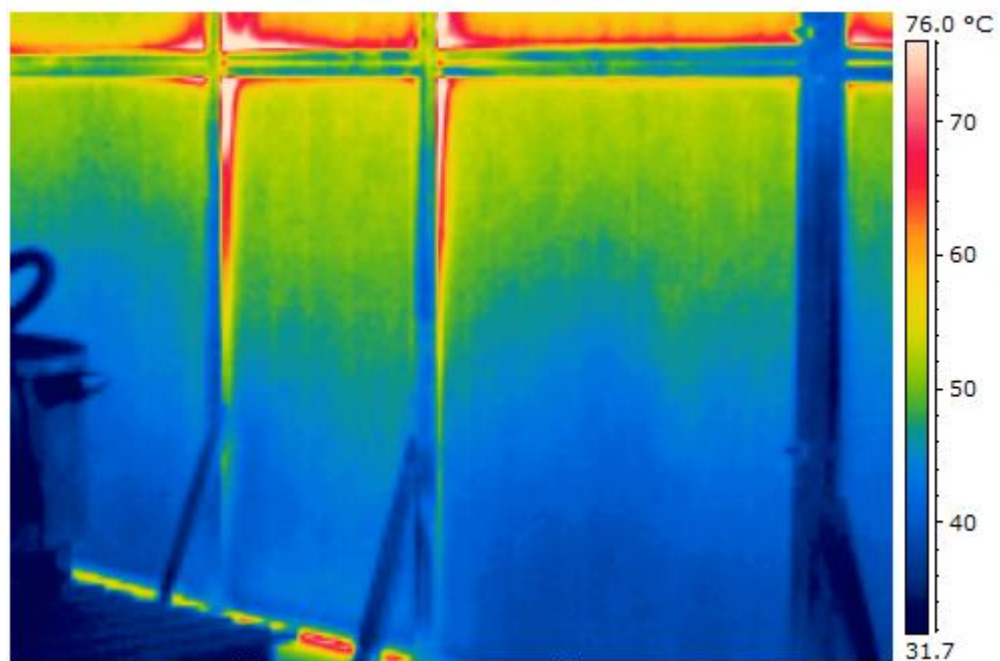


Imagen 2-14. Foto térmica pared 1

6.2.2 Pared 2

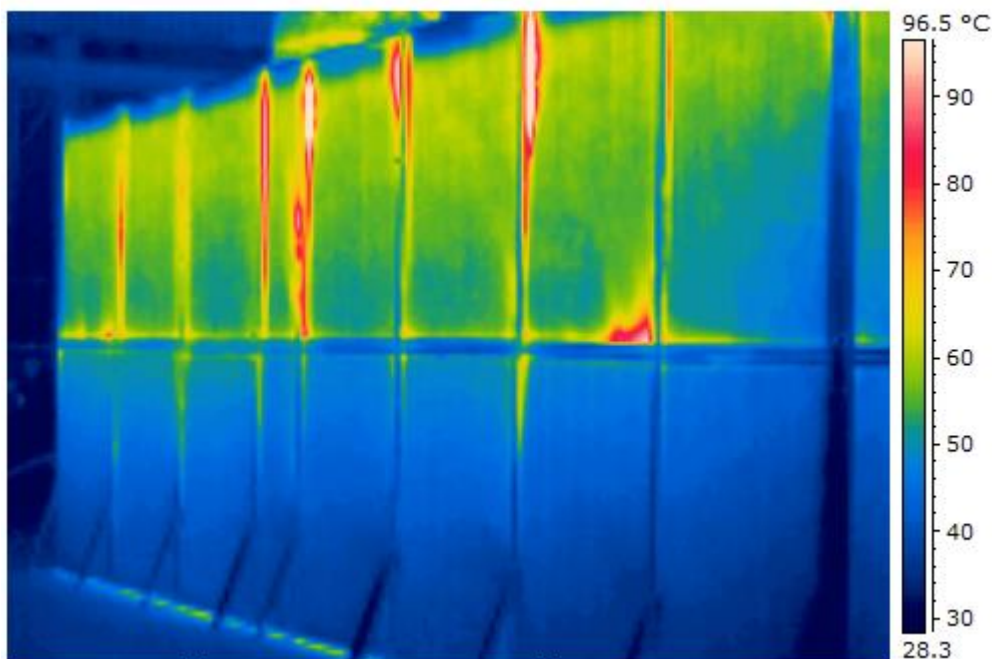


Imagen 2-15. Foto térmica pared 2

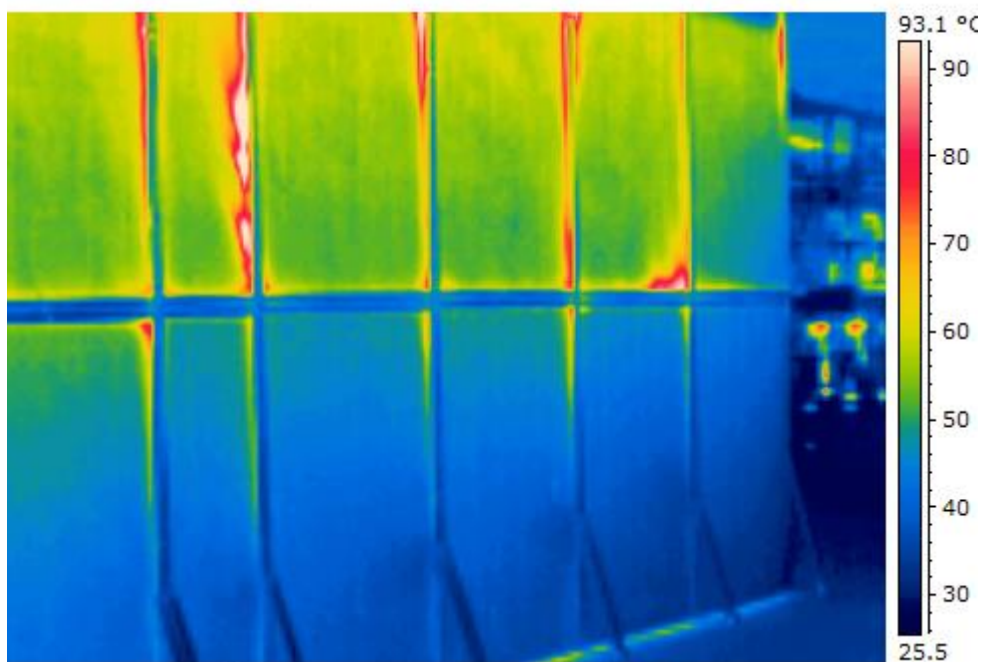


Imagen 2-16. Foto térmica pared 2

6.2.3 Pared 3

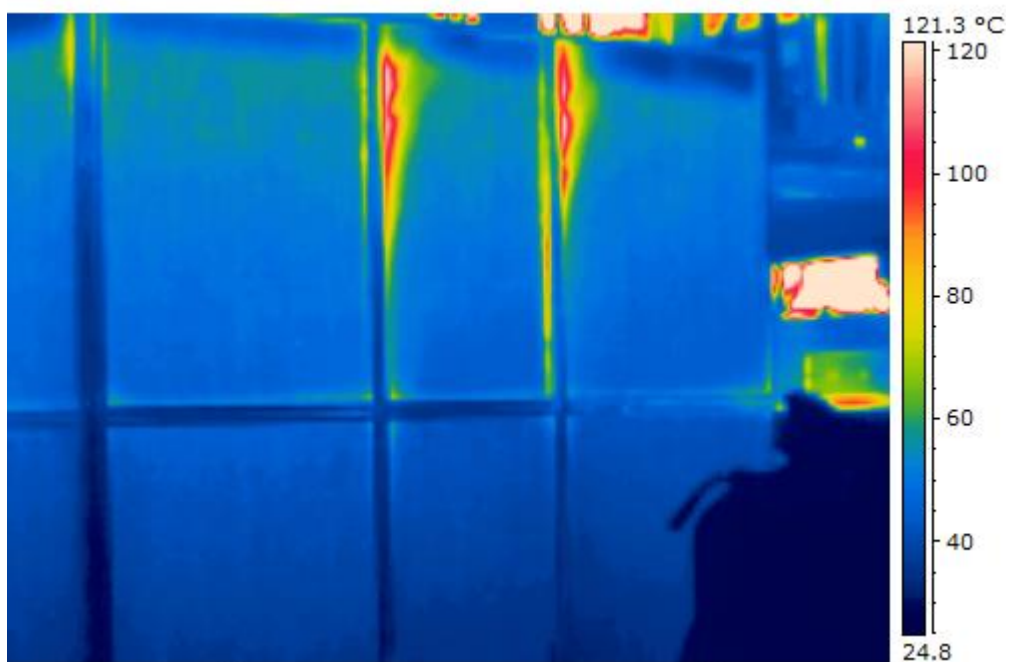


Imagen 2-17. Foto térmica pared 3

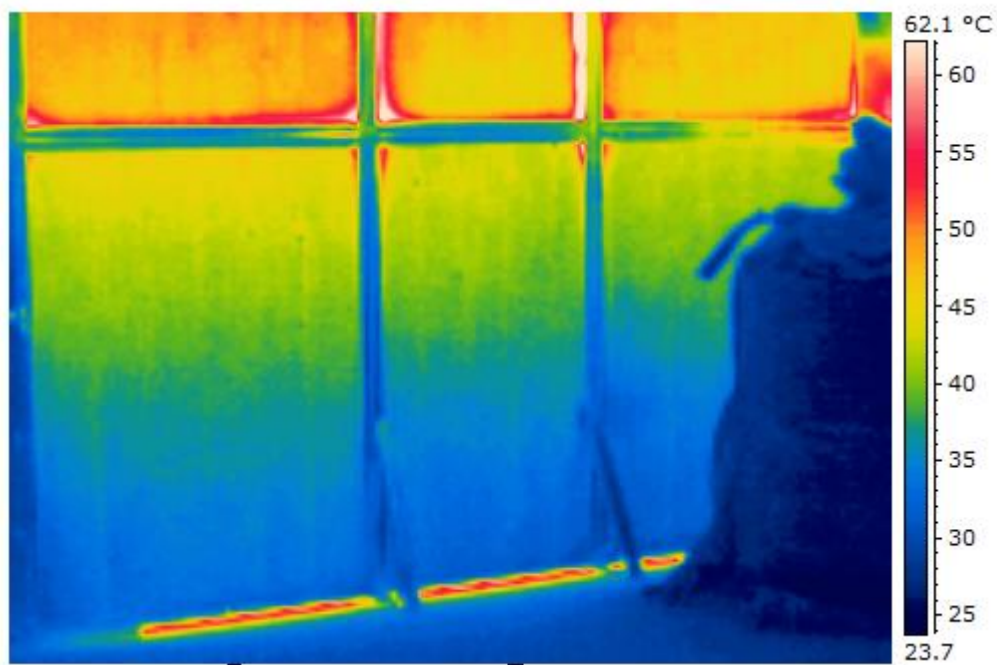


Imagen 2-18. Foto térmica pared 3

6.2.4 Pared 4

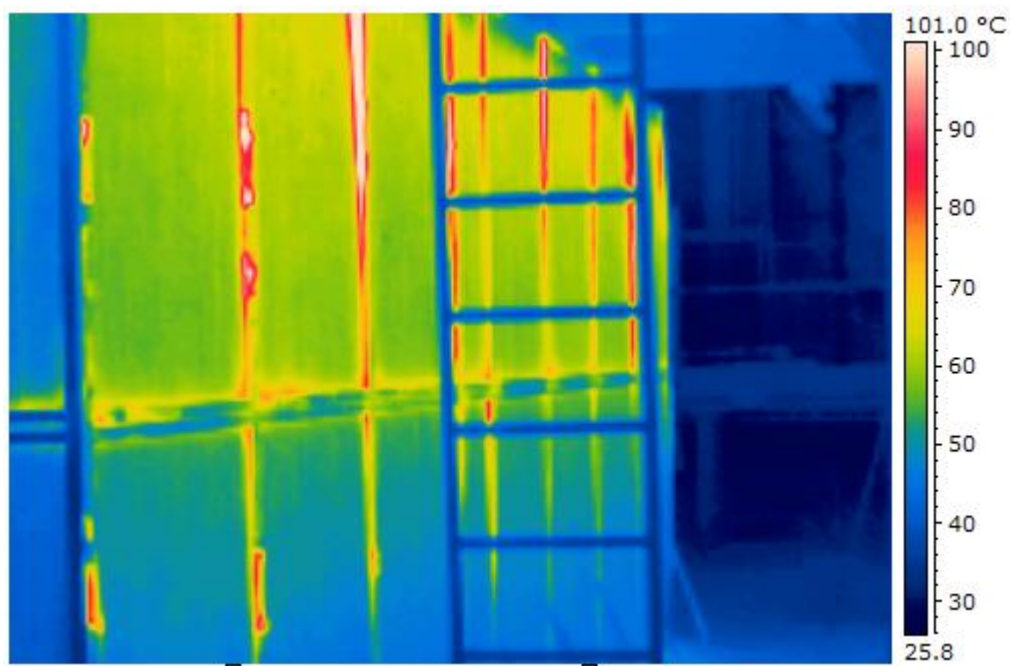


Imagen 2-19. Foto térmica pared 4

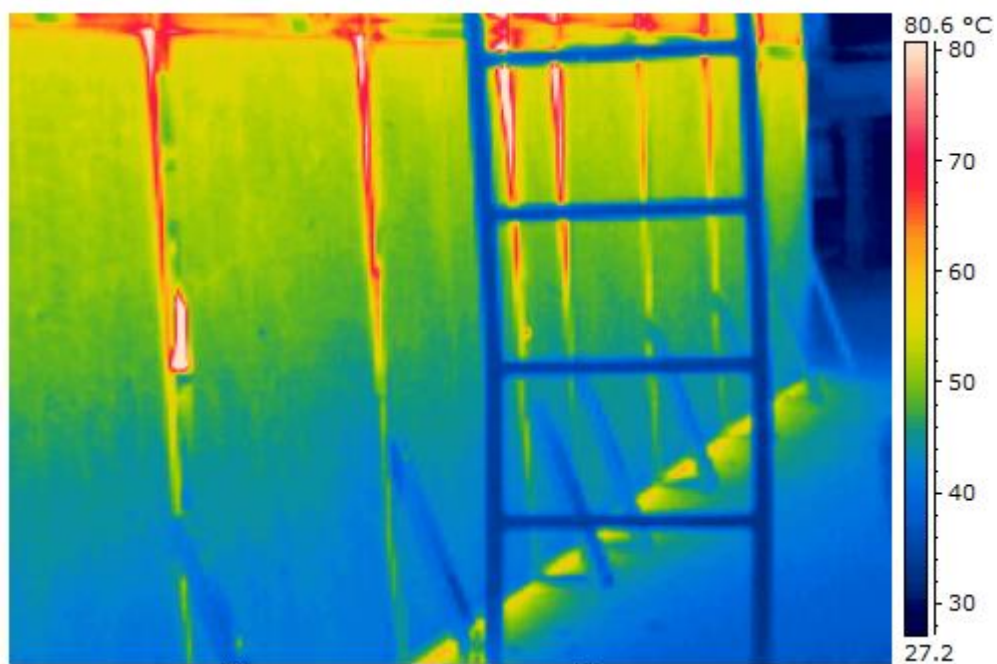


Imagen 2-20. Foto térmica pared 4

6.2.5 Techo

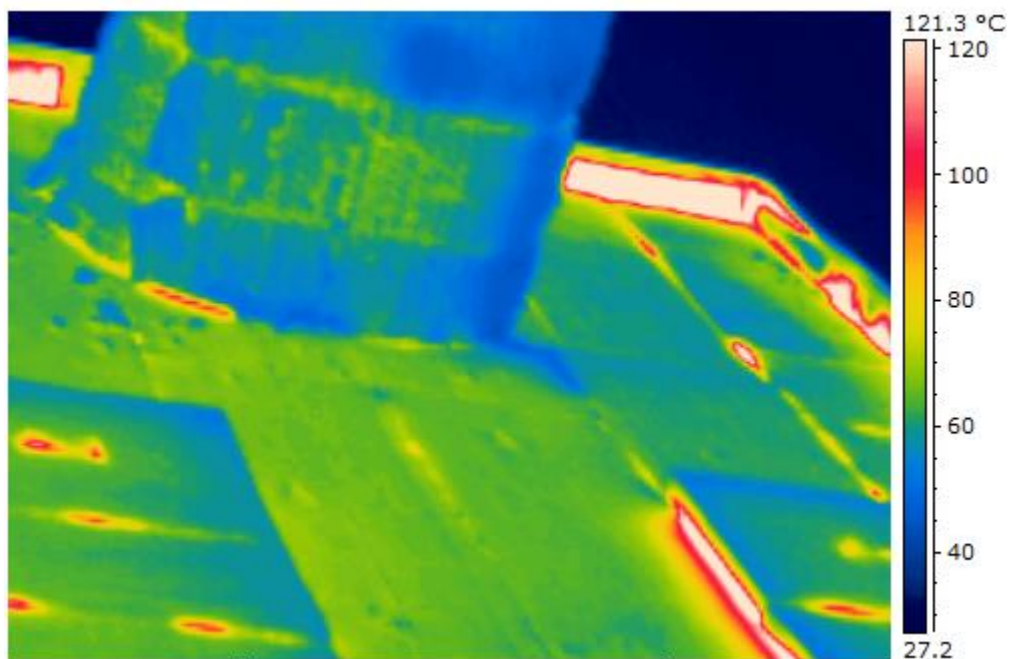


Imagen 2-21. Foto térmica techo

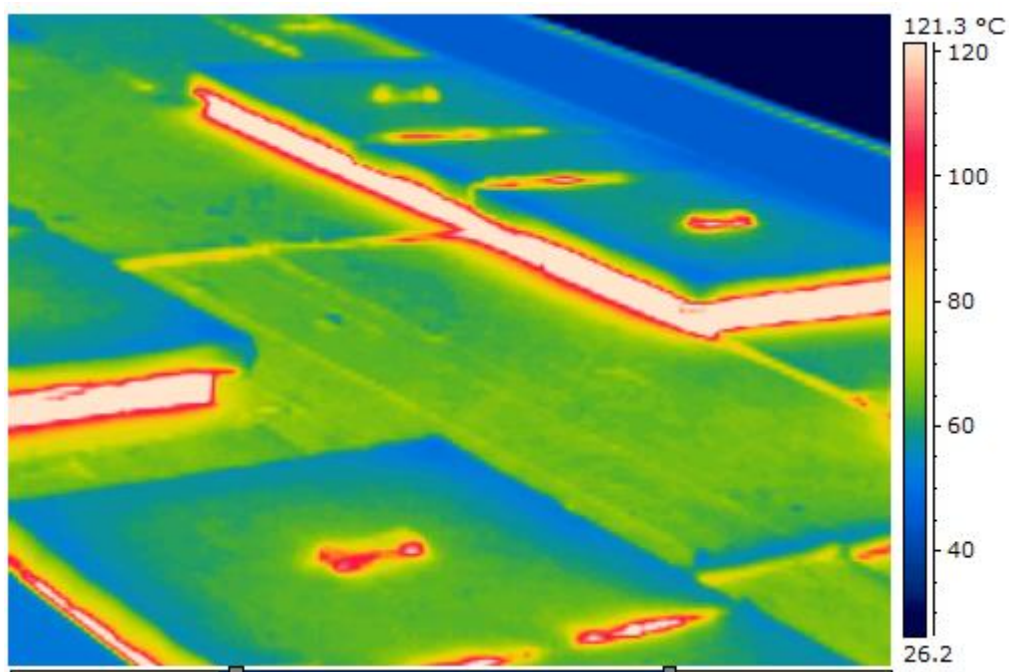


Imagen 2-22. Foto térmica techo

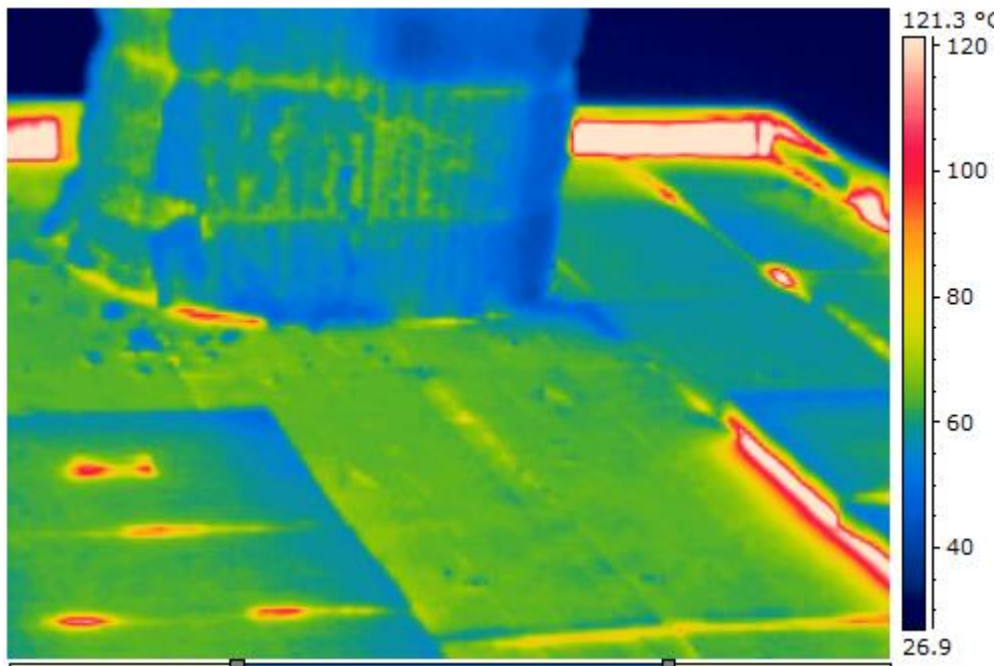
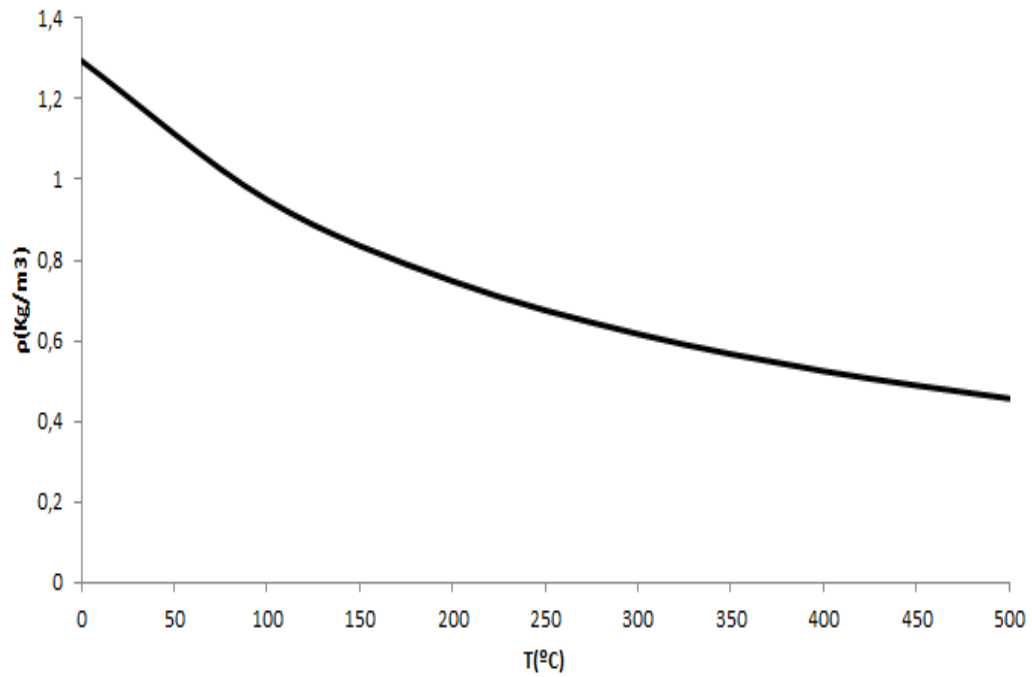


Imagen 2-23. Foto térmica techo

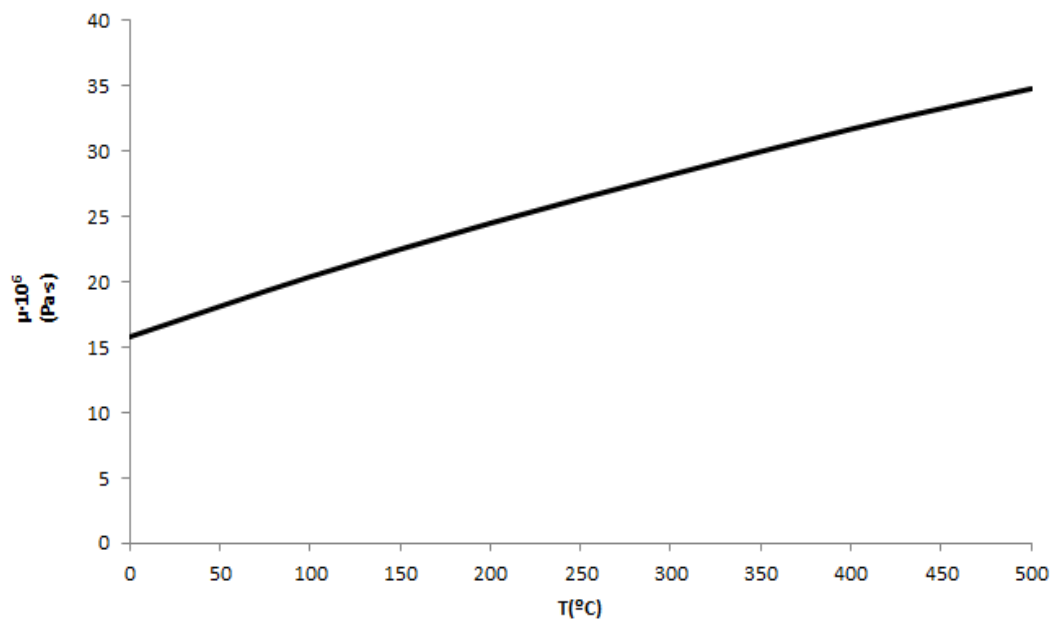
10 .Anexo gráficas

Densidad de los gases de combustión

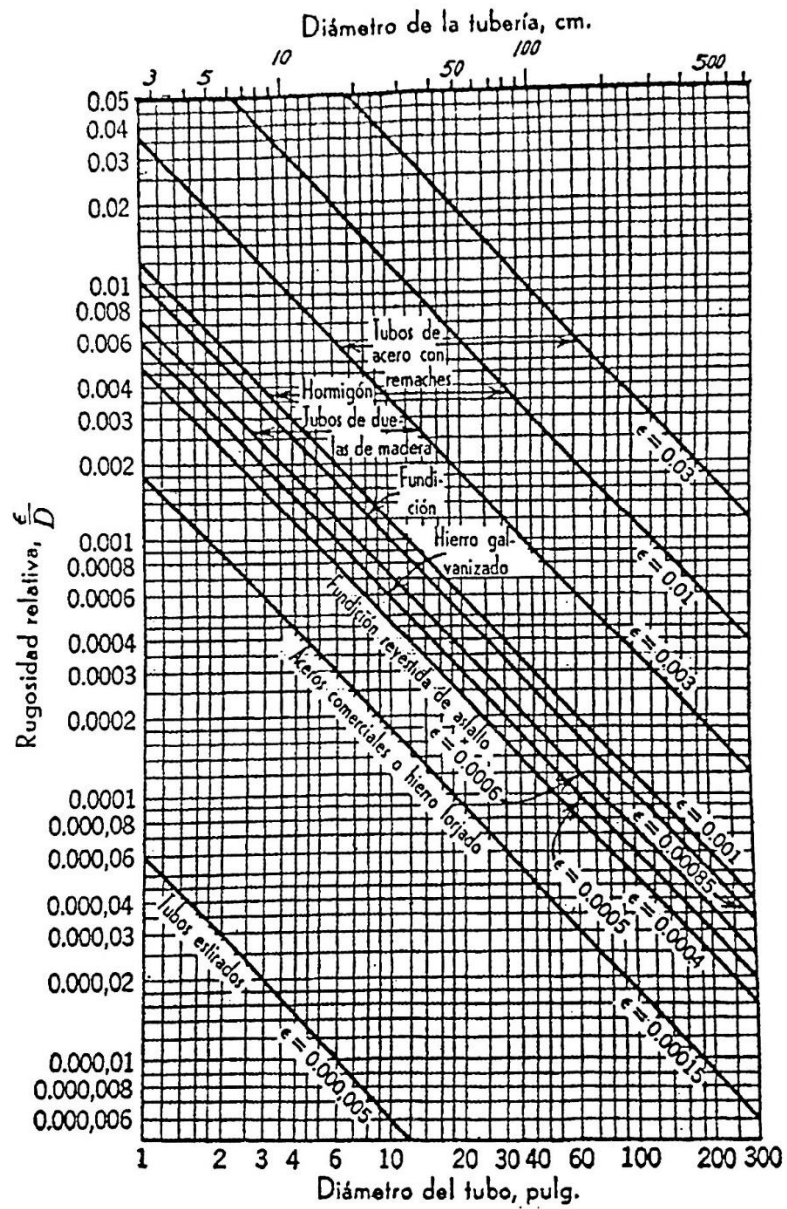


Gráfica 2-2. Densidad de los gases de combustión-

Viscosidad de los gases de combustión



Gráfica 2-3. Viscosidad de los gases de combustión.



Gráfica 2-5. Rugosidad de las conducciones.

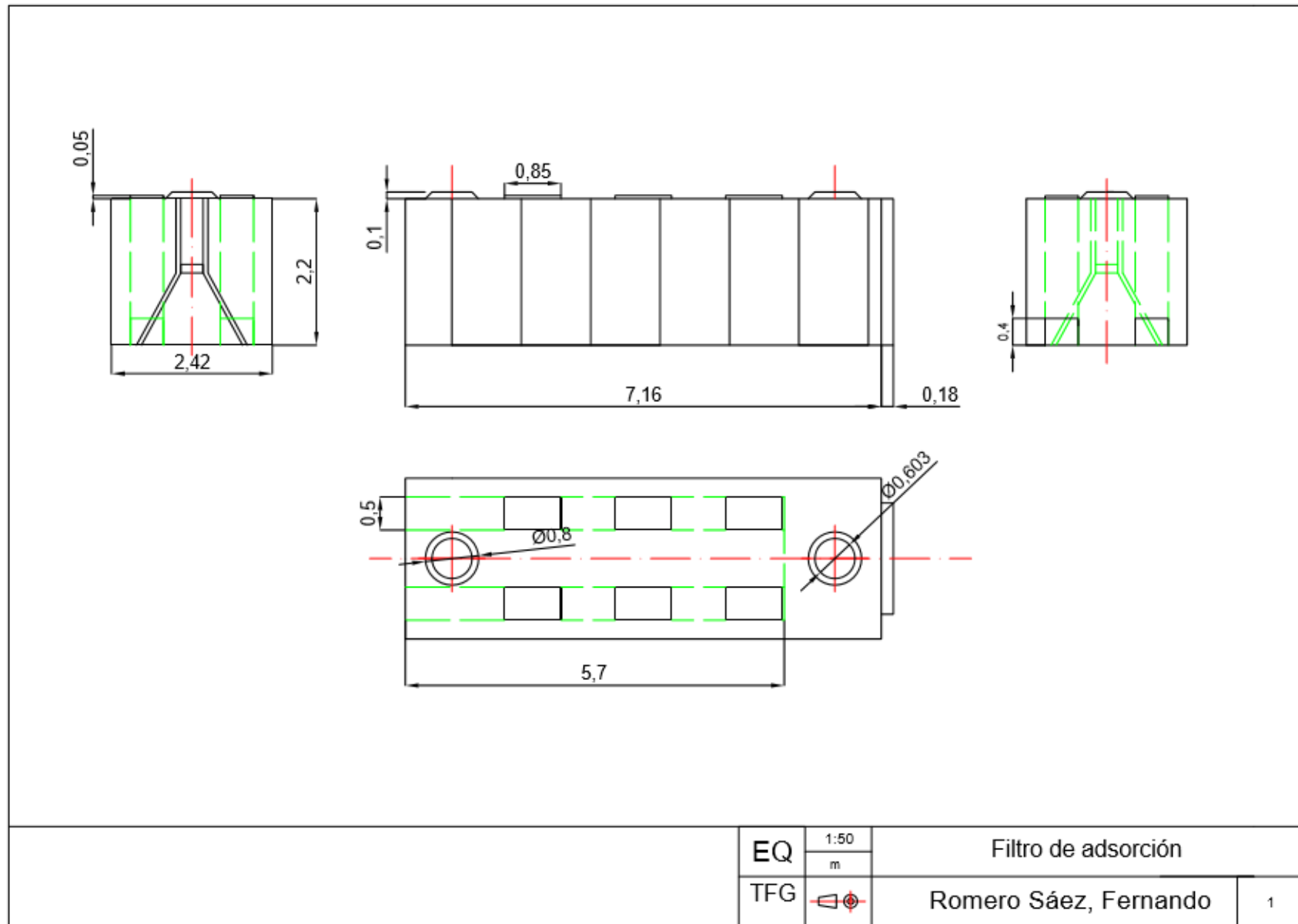


3. Planos

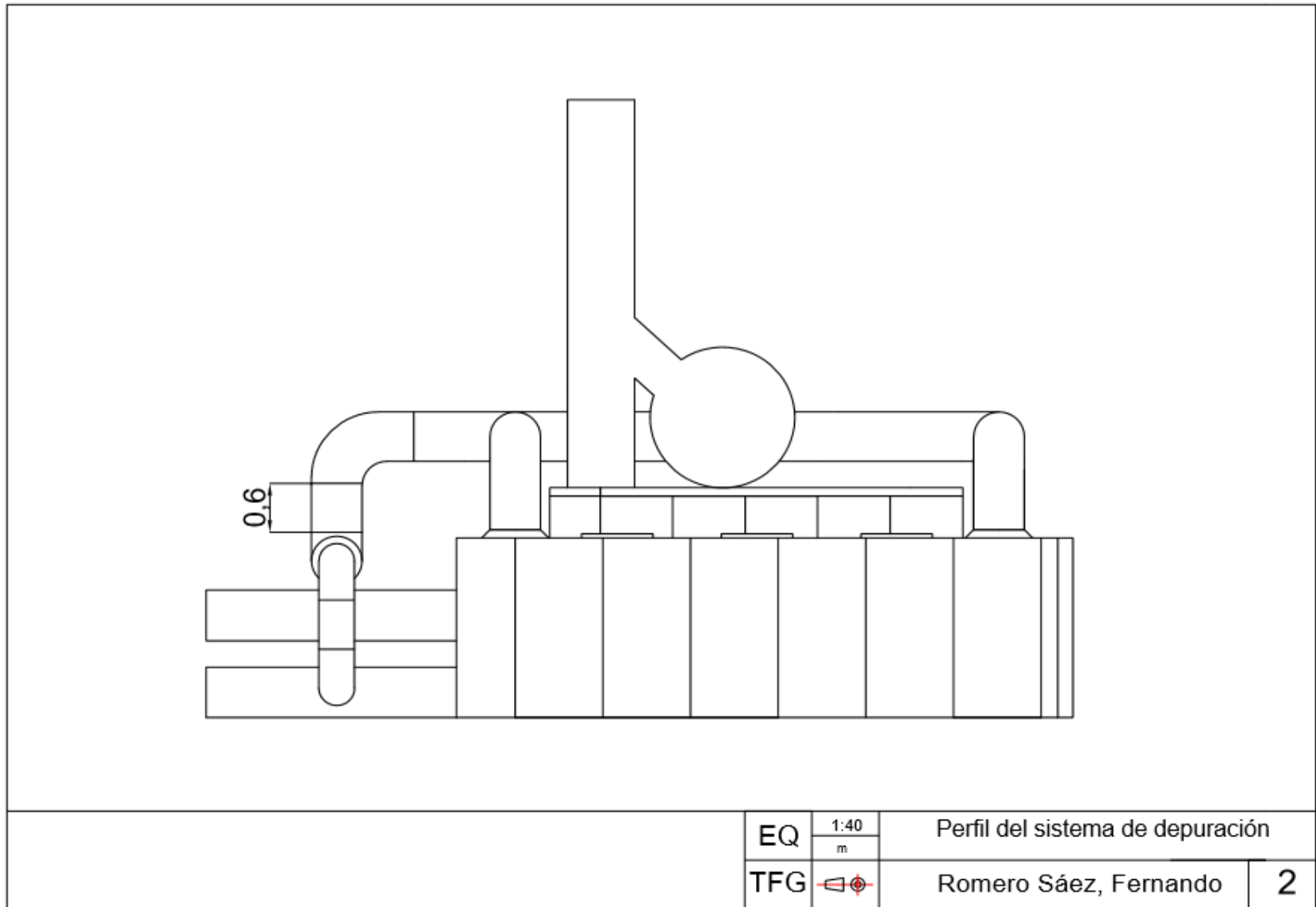
0. Índice

0.	Índice.....	2
1.	Plano del filtro adsorbente	3
2.	Plano de la instalación	4

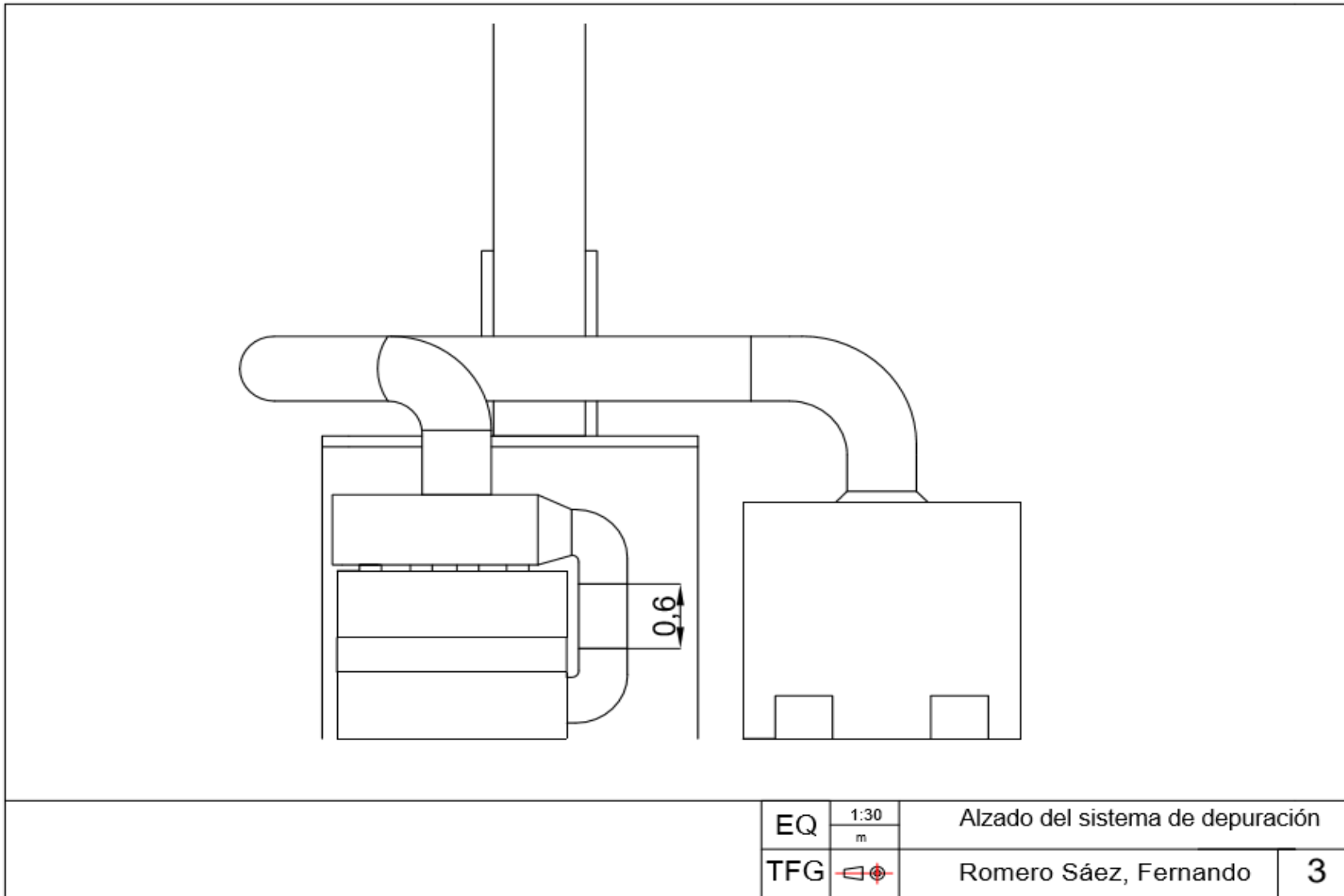
Sistema de depuración de HF de los gases de combustión de un horno monoestrato



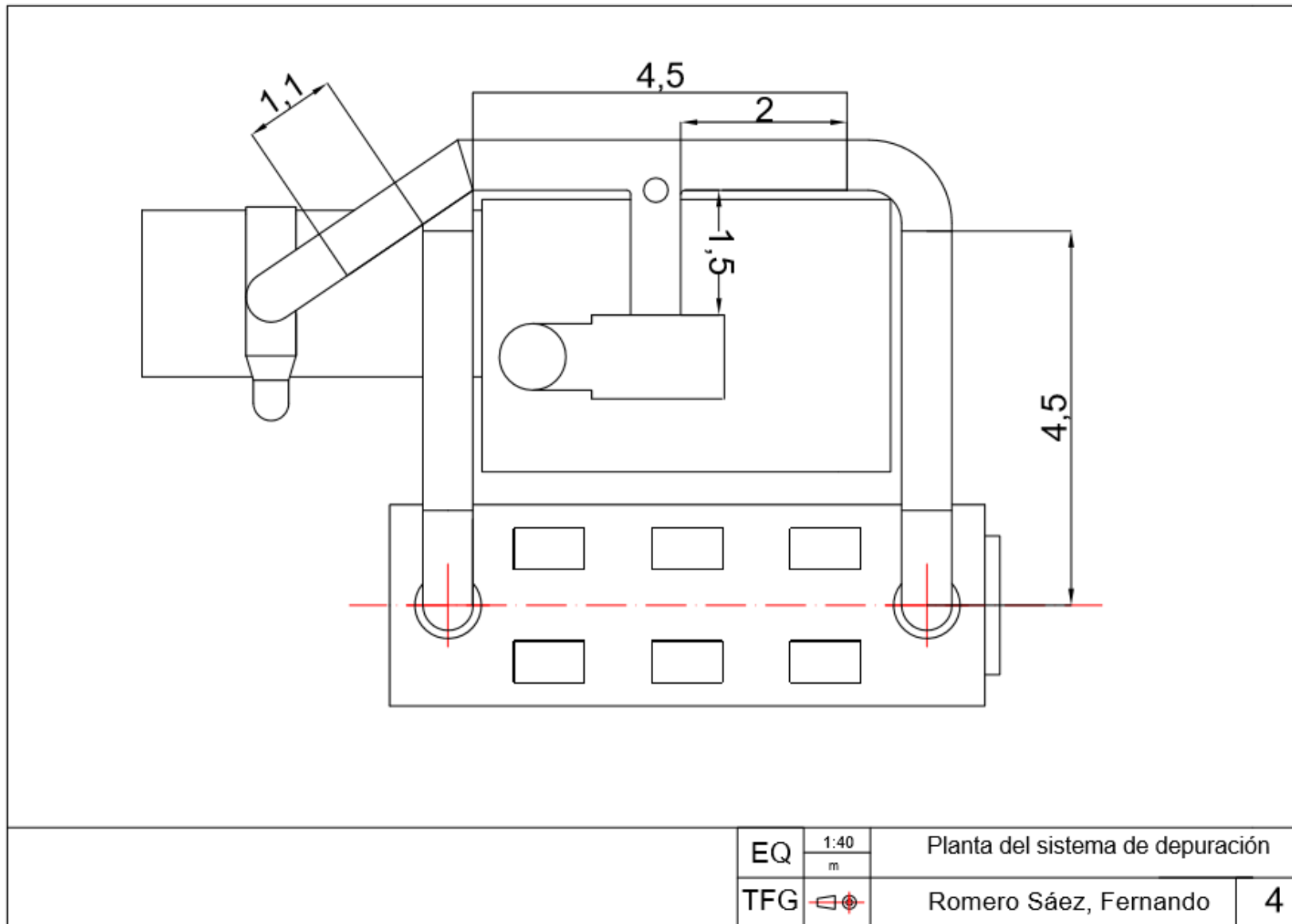
Sistema de depuración de HF de los gases de combustión de un horno monoestrato



Sistema de depuración de HF de los gases de combustión de un horno monoestrato



Sistema de depuración de HF de los gases de combustión de un horno monoestrato





4. Pliego de Condiciones

0. Índice

0. Índice.....	2
1. Condiciones generales con el promotor.....	3
1.1 Sección primera : Instalación del sistema de depuración.....	3
1.2 Sección segunda: Servicio de alquiler del sistema de depuración.....	4
2. Condiciones especiales con el cliente.....	8
3. Condiciones económicas.....	10
4. Régimen de alquiler.....	11
4.1 Servicio de gestión del adsorbente.....	11
4.2 Alquiler del filtro.....	11
4.3 Plazo de entrega.....	11

1. Condiciones generales con el promotor

1.1 Sección primera: Instalación del sistema de depuración

1. Las marcas, tamaños y características de los equipos ofertados pueden variar una vez realizado el replanteo definitivo y trabajo final de ingeniería, sin poder suponer en ningún caso para el cliente un aumento en el coste o un empeoramiento en las características de la instalación ofertada.
2. El contratista garantiza la instalación por un período de un año, contra cualquier defecto de fabricación e incorrecto funcionamiento de la instalación.
3. En los materiales y equipos con garantía propia, se trasladará la garantía que concede el fabricante.
4. La garantía no incluye piezas de desgaste natural y forzado, así como tampoco las averías originadas por una mala mantenimiento, desconocimiento e impericia, por uso de la mismas de forma equivocada o anormal, por someter los equipos a condiciones operativas diferentes a las pactadas, por reparaciones, sustituciones o modificaciones realizadas sin autorización expresa del contratista, o bien por causas de fuerza mayor.
5. La garantía no puede aplicarse a pérdidas de producción, gastos, accidentes (incendios, explosiones, etc.) y consecuencias materiales o corporales que se produzcan por los defectos del producto suministrado.
6. Por el uso indebido de la maquinaria o modificaciones sin previo aviso, la garantía quedara anulada.
7. También quedará sin efecto la garantía en el caso de producirse un retraso o impago por parte del cliente de cualquiera de los plazos estipulados con toda puntualidad.

8. Si no se especifica lo contrario en la oferta; portes, alquiler de plataforma, grúas, electricista y obra civil (cimentación, soleras...) corren a cuenta del cliente.
9. La instalación no requiere de:
 - Obra civil: Movimiento de tierras, cimentaciones, solera, legalización de instalaciones.
 - Instalación de un silenciador a la salida del ventilador.
 - Modificación o cambio del ventilador existente

1.2 Sección segunda: Servicio de alquiler del sistema de depuración

1. La solución contemplada comprende el suministro del filtro, propiedad del contratista, en régimen de alquiler en el domicilio del cliente.
2. El precio del servicio de alquiler contempla la gestión integral del mismo. Este precio incluye el adsorbente específico, logística de entrega del nuevo filtro y recogida del filtro saturado y gestión y documentación asociada al residuo generado. Este precio se aplica una única vez por cada filtro solicitado.
3. El personal del contratista entregará el filtro en las instalaciones del cliente. Así mismo, recogerá el filtro a sustituir, previamente desconectado por el cliente.
4. Si, por cualquier motivo imputable al cliente, el transportista del contratista hubiera de esperarse más de 30 minutos, el contratista facturaría un cargo adicional. Si por cualquier circunstancia imputable al cliente, se hubiera de aplazar la sustitución del filtro para otro día, cuando el

transporte del contratista ya hubiera partido en dirección al cliente, éste último deberá de abonar el coste de transporte adicional ocasionado por tal circunstancia.

5. En cualquier momento, el cliente puede realizar una renovación del filtro, solicitando una nueva contratación del servicio.
6. El contratista facturará el último día de cada mes el computo de días del alquiler del filtro.
7. El cliente autoriza a que el contratista lleve a cabo mediciones a la entrada y a la salida del filtro, para supervisar su correcto funcionamiento.
8. El cliente se abstendrá de manipular los filtros sin la supervisión de los técnicos del contratista y menos aún de abrirlos, tocar el adsorbente, sustituirlo, incorporar otros productos en su interior o en definitiva llevar a cabo cualquier manipulación que pudiera afectar a su funcionamiento. De producirse esta manipulación, se perderá automáticamente la garantía de los mismos, quedando el contratista eximido de cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de esta actuación.
9. El rendimiento de los filtros, se ha calculado en base a las condiciones operativas acordadas con el cliente. Cualquier variación sobre estas condiciones, podría comportar una alteración de las previsiones de rendimiento, quedando el contratista exento de cualquier responsabilidad al respecto.
10. Dentro del precio acordado en la presente oferta está incluida la gestión del adsorbente como residuo. En caso de aparecer contaminantes en el adsorbente no previstos en las condiciones previamente establecidas, el cliente será el responsable de las consecuencias económicas y legales que esta circunstancia acarree.

11. El contratista podrá incorporar en todo momento mejoras o variaciones en los filtros, siempre y cuando no supongan un coste adicional para el cliente, ni una reducción a las prestaciones del producto o servicio.
12. En el caso de producirse un daño en el filtro por causas imputables al cliente, el contratista le descontará de la fianza el coste de reparación, reposición y/o sustitución que resulte.
13. Todos los filtros cuentan con un número de serie único. El contratista lleva a cabo un control de trazabilidad exhaustivo de los filtros. En el caso de detectarse que los filtros retirados de las instalaciones del cliente, contienen algún componente peligroso no contemplado en la información provista por el cliente, que comporte un coste adicional de gestión de tratamiento, disposición o eliminación, este coste adicional será asumido por el cliente y convenientemente facturado por el contratista.
14. Cuando el cliente decida rescindir el servicio contratado al contratista, el contratista tendrá derecho a retirar los filtros de las instalaciones del cliente de forma inmediata. Los filtros siempre son y serán propiedad del contratista. Del mismo modo, el cliente tendrá derecho a recuperar la fianza que había entregado al contratista en el momento de la contratación.
15. El contratista tendrá derecho de forma inmediata a retirar los filtros de las instalaciones del cliente en el caso del no cumplimiento, por parte del cliente, de cualquiera de las condiciones especificadas.
16. A la finalización de la presente oferta, con independencia de cuál sea su causa, el cliente devolverá al contratista cualquier documentación vinculada a los filtros que éste le haya facilitado en virtud de la presente oferta.
17. Los precios de la oferta una vez aceptada podrán estar sujetos a una revisión anual y notificada por el contratista mediante escrito.

18. Con carácter especial, las partes acuerdan que, en el supuesto de que el cliente entre en situación concursal, se estará a lo dispuesto en la Ley 22/2003, de 9 de Julio, Concursal, y demás legislación aplicable al respecto. Asimismo, en este supuesto, el cliente, de forma expresa autoriza al contratista a retirar los filtros de sus instalaciones, para que el contratista recupere de forma inmediata los mismos. A tal fin, el cliente autoriza expresamente al contratista la entrada en sus instalaciones a los técnicos que ésta designe para la retirada de los filtros.

19. El cliente autoriza al contratista a acceder a sus instalaciones con el propósito de retirar los filtros en el supuesto de finalización del contrato de alquiler, con independencia de su causa. En el supuesto de que los filtros no se restituyan en las condiciones pactadas en la presente oferta, el contratista podrá reclamar a l cliente los correspondientes daños y perjuicios.

2. Condiciones especiales con el cliente

Las condiciones especiales se aplican al cliente por encontrarse el sistema de depuración en una fase de pruebas.

1. El contratista aplica un descuento del 20% al concepto Servicio Cambio Filtro.
2. El contratista aplica un descuento del 45,6% al concepto de Alquiler Filtro.
3. El contratista elimina íntegramente el concepto de fianza para el cliente en este contrato.
4. El pago del concepto Servicio Cambio Filtro -I, por parte del cliente queda como:
 - 50% a la hora de aceptar el pedido.
 - 25% supeditado a una certificación por parte de O.C.A. (a elección del cliente) del cumplimiento de la normativa vigente referente a las emisiones de HF. Esta certificación debe realizarse durante los primeros 3 meses de funcionamiento del sistema de depuración.
 - 25% restante al año de la puesta en marcha del sistema, supeditado a una certificación por parte de O.C.A. (a elección del cliente) del cumplimiento de la normativa vigente referente a las emisiones de HF. Esta certificación debe realizarse durante el primer año de funcionamiento del sistema de depuración.
 - En caso de no conformidad por parte del cliente, este último pago no se llevaría a cabo.
5. El contratista concede una garantía total sobre la nueva instalación para el sistema de depuración. Esto significa que antes de los tres primeros meses de funcionamiento de la instalación se realizará una certificación por parte

de O.C.A del cumplimiento de la normativa vigente referente a las emisiones de HF. En caso de no conformidad, el contratista dispone de la obligación de realizar mejoras técnicas para el correcto funcionamiento del sistema o, en su defecto, abonar todos los gastos al cliente correspondientes a la adecuación para instalar el filtro en sus instalaciones.

6. A cambio de las condiciones especiales detalladas en los puntos anteriores, el cliente autoriza al contratista a utilizar su nombre en presentaciones comerciales y disponer de sus instalaciones, siempre previo aviso, para visitas puntuales de clientes interesados en conocer sistemas de filtración operativos.

3. Condiciones económicas

Forma de pago sobre los trabajos de implementación de las instalaciones fijas ofertadas:

- 50% a la aceptación de la oferta, mediante transferencia bancaria.
- 25% a la entrega de materiales en las instalaciones del cliente, mediante transferencia bancaria.
- 25% a la finalización de los trabajos mediante transferencia bancaria.

Forma de pago para el servicio de Alquiler Filtros:

- Contratación Servicio Filtro:
 - 50% del total a 30 días fecha de factura. Factura emitida a la entrega del filtro.
 - 25% del total a la certificación, por parte de OCA, del cumplimiento de la normativa ambiental, referente al HF.
 - 25% restante al año de la puesta en marcha del sistema, supeditado a una certificación O.C.A, del cumplimiento de la normativa ambiental, referente al HF.
- Alquiler Filtro
 - Pago a 30 días de fecha factura. La factura se emite a mes vencido, computando los días totales de alquiler.

Cualquier variación de estas condiciones de pago, que comporten un retraso en las fechas de vencimiento, conllevará por parte del contratista, la aplicación de los gastos financieros oportunos.

4. Régimen de alquiler

Los filtros móviles se ofrecen en régimen de alquiler, el cual incluye:

4.1 Servicio de gestión del adsorbente

- Adsorbente específico de HF
- Gestión del residuo
- Documentación de la gestión del residuo
- Logística de entrega y retirada

4.2 Alquiler del filtro

- Alquiler del equipo de filtrado
- Se computan los días que el filtro está en las instalaciones del cliente

4.3 Plazo de entrega

- A convenir con el cliente para coordinar una parada de producción



5. Estado de mediciones

0. Índice

0.	Índice	2
1.	Antes de la instalación del sistema de depuración.....	3
2.	Material a instalar	4
3.	Después de la instalación del sistema de de puración	11

1. Antes de la instalación del sistema de depuración

Descripción	Cantidad (Unidades)	Longitud (m)
Tubería de acero S 195 T de diámetro externo 48,3 cm y espesor de 3,2 cm (DIN 2440)	1	0,6
Tubería de acero S 195 T de diámetro externo 60,3 cm y espesor de 3,6 cm (DIN 2440)	1	5,2
Codo de 90°	4	-
Codo de 45°	1	-
T Standard	1	-
Ensanchamiento	1	-
Entradas redondeadas	8	-
Ventilador centrífugo de 30 kW	1	

Tabla 5-1. Descripción de los equipos antes de la instalación.

2. Material a instalar

Descripción	Cantidad (Unidades)	Longitud (m)
Tubería de acero S 195 T de diámetro externo 60,3 cm y espesor de 3,6 cm (DIN 2440) recubiertas con 8 cm de espesor de lana de roca	1	11,5
Codo de 90°	2	-
T Standard	2	-
Ensanchamiento	1	-
Estrechamiento	1	-
Válvulas de mariposa	3	-
Filtro de adsorción	1	-
Escalera	1	-
Vallado de seguridad del filtro de (8,05m x 2,75m x 2m de altura (pilares y traviesas de perfil hueco y malla de seguridad con varillas verticales y horizontales, además de una puerta abatible con bisagras).	1	-

Tabla 5-2. Material a instalar.

3. Después la instalación del sistema de depuración

Descripción	Cantidad (Unidades)	Longitud (m)
Tubería de acero S 195 T de diámetro externo 48,3 cm y espesor de 3,2 cm (DIN 2440) recubiertas con 8 cm de espesor de lana de roca	1	0,6
Tubería de acero S 195 T de diámetro externo 60,3 cm y espesor de 3,6 cm (DIN 2440) recubiertas con 8 cm de espesor de lana de roca	1	16,7
Codo de 90°	6	-
T Standard	3	-
Ensanchamiento	2	-
Estrechamiento	1	-
Entradas redondeadas	8	-
Válvulas de mariposa	3	-
Filtro de adsorción	1	-
Ventilador centrífugo de 30 kW	1	-
Escalera	1	-
Vallado de seguridad del filtro de (8,05m x 2,75m x 2m de altura (pilares y traviesas de perfil hueco y malla de seguridad con varillas verticales y horizontales, además de una puerta abatible con bisagras).	1	-

Tabla 5-3. Descripción de los equipos después de la instalación.



6. Presupuesto

0. Índice

0.	Índice	2
1.	Presupuesto de material	3
2.	Presupuesto de cambio de filtro.....	4
3.	Inversión inicial	5

1. Presupuesto de material

El precio del montaje incluye:

- Transporte de los materiales hasta las instalaciones del cliente.
- Montaje completo del sistema.
- Guías de ayuda para el montaje.
- Dietas y desplazamientos.
- Tornillería.
- Materiales necesarios (apartado 2 de Estado de Mediciones).
- Ingeniería.

Se recoge el presupuesto del material en la tabla 6.1:

Descripción	Cantidad	Importe
Montaje	1	32.238,32€
Material conducciones	1	Incluido
Juego de vallas y escalera	1	2.742,09€
	Total	34.980,41 €

Tabla 6-1. Presupuesto del material.

2. Presupuesto de cambio de filtro

El coste del cambio de filtro al finalizar su vida útil se incluye en la tabla 6-2. Este presupuesto no computa para la inversión inicial, sino como coste de operación (gasto dependiente de la producción):

Descripción	Cantidad	Importe inicial	Importe Oferta
Adsorbente específico (kg)	10.000	32.000,00€	25.600,00€
Gestión de residuo	1	Incluido	Incluido
Documentación de gestión de residuo	1	Incluido	Incluido
Logística de entrada y retirada	1	Incluido	Incluido
Alquiler del equipo de filtrado	1	58,80 €/día	32,00 €/día
Fianza del filtro	1	22.500 €	0,00€
		Total	37.280,00 €

Tabla 6-2. Presupuesto del equipo de filtrado.

3. Inversión inicial

En primer lugar, se calcula el presupuesto de ejecución de material. El PEM es el precio de ejecución de la obra a realizar, por lo que, teniendo en cuenta que el presupuesto filtro cuenta como coste de operación, se construye la tabla 6-3:

Presupuesto	Coste (€)
Material	34.980,41
Total	34.980,41

Tabla 6-3. Presupuesto de ejecución de material.

Por otro lado, el presupuesto de ejecución por contrata se calcula a partir del PEM. Se supone un gasto general del 12% y un beneficio industrial del 6%.

Al presupuesto de ejecución por contrata sin incluir impuestos se le llama parcial (tabla 6-4):

PEM (€)	Gasto General (€)	Beneficio industrial (€)	PEC_p (€)
34.980,41	4.197,65	2.098,82	41.276,88

Tabla 6-4. Cálculo del presupuesto de ejecución por contrata parcial.

Finalmente, añadiendo los impuestos (21 % IVA) se obtiene el coste del presupuesto de ejecución por contrata:

$$PEC = 41.276,88 + 0,21 \cdot 41.276,88 = 49.945,02 \text{ €}$$

Es decir, el coste de la inversión inicial es de 49.945,02 €.