



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



**ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA**

Curso Académico:

RESUMEN

El presente Trabajo Final de Máster tiene como objetivo el diseño de un sistema de tratamiento de las emisiones atmosféricas que se producen en una fábrica de fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel). La finalidad es cumplir con los límites que marca la Autorización Ambiental Integrada de la empresa.

Para ello, en primer lugar se describe la empresa para identificar sus focos de emisión. A continuación, se realiza una caracterización de las emisiones atmosféricas y se efectúa una búsqueda bibliográfica de las Mejores Técnicas Disponibles para tratar dichas emisiones en el sector de la industria de fertilizantes.

En base a dicha información, se elige el sistema de tratamiento más adecuado y se procede a realizar los cálculos pertinentes para llevar a cabo el diseño de las instalaciones. El sistema diseñado para cumplir con los requisitos de la Autorización Ambiental Integrada consta de un ciclón, para eliminar las partículas de mayor tamaño, y un lavador Venturi, que captará las partículas de menor tamaño y los gases ácidos. Además de estos dos equipos, se ha añadido una torre de aspersión, cuya instalación se llevará a cabo tras la puesta en funcionamiento del sistema en caso de requerir un mayor rendimiento de captación de contaminantes.

Tras diseñar los equipos de tratamiento de gas residual, se ha llevado a cabo el cálculo del sistema de aspiración: conducciones, elemento de captación y ventilador, y de las conducciones hidráulicas: tuberías, accesorios y bombas. Con el fin de lograr un correcto funcionamiento del sistema se ha realizado un estudio de los equipos de instrumentación requeridos para automatizar y controlar la instalación bajo unos parámetros fijados. Para concluir, se han desarrollado los cálculos eléctricos pertinentes para alimentar desde un cuadro eléctrico secundario a todos los equipos receptores.

Palabras Clave: fertilizantes, partículas, ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, emisiones atmosféricas, tratamiento gas residual, Mejores Técnicas Disponibles, lavador de gases

RESUM

El present Treball Final de Màster té com a objectiu el disseny d'un sistema de tractament de les emissions atmosfèriques que es produïxen en una fàbrica de fertilitzants ubicada en Sarrión (Terol) . La finalitat és complir amb els límits que marca l'Autorització Ambiental Integrada de l'empresa.

Per a això, en primer lloc es descriu l'empresa per a identificar els seus focus d'emissió. A continuació, es realitza una caracterització de les emissions atmosfèriques i s'efectua una cerca bibliogràfica de les Millors Tècniques Disponibles per a tractar les dites emissions en el sector de la indústria de fertilitzants.

Basant-se en la dita informació, es tria el sistema de tractament més adequat i es procedix a realitzar els càlculs pertinents per a dur a terme el disseny de les instal·lacions. El sistema dissenyat per a complir amb els requisits de l'Autorització Ambiental Integrada consta d'un cicló, per a eliminar les partícules més grans, i un rentador Venturi, que captarà les partícules més xicotetes i els gasos àcids. A més d'aquests dos equips, s'ha afegit una torre d'aspersió, la instal·lació de la qual es durà a terme després de la posada en funcionament del sistema en cas de requerir un major rendiment de captació de contaminants.

Després de dissenyar els equips de tractament de gas residual, s'ha dut a terme el càlcul del sistema d'aspiració: conduccions, element de captació i ventilador, i de les conduccions hidràuliques: canonades, accessoris i bombes. A fi d'aconseguir un funcionament correcte del sistema s'ha realitzat un estudi dels equips d'instrumentació requerits per a automatitzar i controlar la instal·lació sota uns paràmetres fixats. Per a concloure, s'han desenvolupat els càlculs elèctrics pertinents per a alimentar des d'un quadre elèctric secundari a tots els equips receptors.

Paraules clau: fertilitzants, partícules, àcid clorhídric, àcid fluorhídric, emissions atmosfèriques, tractament gas residual, Millors Tècniques Disponibles, llavador de gasos

ABSTRACT

This Final Project aims to design a system of waste gas treatment in a fertilizers industry in the village of Sarrión (Teruel). The purpose is meet stablished legal limits of the company Integrated Environmental Authorization.

For it, first the factory is described to identify where there have been the gas emissions. Then, the gas emissions characteristics are analyzed and a search of the Best Available Techniques to waste gas treatment from fertilizers industry is carried out.

Based on the collected information, the most appropriate gas treatment system is chosen and the design has been begun. The system designed in order to fulfill the requirements of the Integrated Environmental Authorization consists of a cyclone, to remove the biggest particles, and a Venturi scrubber, to remove the small particles and the acids gases. In addition to these technologies, a spray tower has been designed; the tower installation will be done if the remove efficiency of the system is not sufficient.

After the systems have been designed, the calculation of the aspiration systems has been carried out: air ducts, hood and fan; and of the hydraulic lines: pipes, accessories and pumps. In order to the system works properly, a research has been made of the instrumentation equipment required to automate and control the installation under predetermined parameters. In conclusion, the basic electric study has been developed to supply energy input to the equipment from an electrical panel.

Keywords: fertilizers, particles, hydrochloric acid, hydrofluoric acid, air emissions, waste gas treatment, Best Available Techniques, scrubber

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Documento nº1: Memoria
- Documento nº2: Presupuesto
- Documento nº3: Planos

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Objeto y Justificación	1
1.1. Objeto general.....	1
1.2. Objetos parciales.....	1
1.3. Justificación	1
Capítulo 2. Introducción.....	3
2.1. Fertilizantes: descripción y aplicaciones	3
2.2. Situación actual del sector de los fertilizantes.....	5
Capítulo 3. Descripción de la Empresa.....	7
3.1. Fertinagro Biotech.....	7
3.2. Proceso productivo	7
3.2.1. Solubilización.....	9
3.2.2. Granulación	11
3.2.3. Envasado y carga de camiones a granel.....	15
Capítulo 4. Legislación Aplicable	17
4.1. Legislación en medidas de emisión.....	17
4.2. Legislación en medidas de inmisión.....	18
Capítulo 5. Autorización Ambiental Integrada.....	21
5.1. Antecedentes	21
5.2. Autorización Ambiental Integrada de la empresa	21
5.2.1. Descripción de la instalación.....	21
5.2.2. Consumos.....	22
5.2.3. Aguas residuales.....	22
5.2.4. Emisiones a la atmósfera	23
5.2.5. Emisiones de ruidos	25
5.2.6. Producción de residuos.....	25
Capítulo 6. Mejores técnicas disponibles.....	27
6.1. Visión general.....	27
6.2. Mejores Técnicas Disponibles para el tratamiento de gases residuales en la industria química.....	27
6.2.1. Técnicas de tratamiento de partículas.....	29
6.2.2. Técnicas de recuperación de compuestos inorgánicos: lavadores húmedos para la eliminación de gases	31

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Capítulo 7. Caracterización de los Gases a Tratar	35
7.1. Identificación de los gases a tratar.....	35
7.2. Caracterización del gas a tratar.....	36
Capítulo 8. Diseño del Lavador de Gases	41
8.1. Descripción del sistema propuesto	41
8.1.1. Elección de la primera etapa.....	41
8.1.2. Elección de la segunda etapa	42
8.1.3. Elección de la tercera etapa	43
8.2. Diseño del ciclón	44
8.2.1. Dimensiones geométricas	44
8.2.2. Revoluciones del gas dentro del ciclón	45
8.2.3. Tamaño de partícula con eficiencia de recolección del 50%	45
8.2.4. Eficacia de recolección	46
8.2.5. Pérdida de carga.....	47
8.2.6. Cálculos	47
8.2.7. Fabricación del ciclón diseñado	53
8.3. Diseño del colector húmedo de alta energía: lavador venturi.....	54
8.4.1. Sección de la garganta.....	54
8.4.2. Velocidad en la garganta.....	55
8.4.3. Relación de líquido a gas	55
8.4.4. Selección del líquido de lavado	55
8.4.5. Caída de presión.....	55
8.4.6. Tamaño de gota medio	56
8.4.7. Factor inercial de impacto.....	56
8.4.8. Eficiencia de recolección de partículas	56
8.4.9. Dimensiones geométricas	57
8.4.10. Consumo de energía	58
8.4.11. Razón de drenado del líquido lavador	58
8.4.12. Cálculos	59
8.4.13. Fabricación del lavador Venturi diseñado.....	66
8.5. Torre de aspersión	74
8.5.1. Diámetro de la torre.....	74
8.5.2. Tiempo de residencia	74

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

8.5.3. Altura de la torre	74
8.5.4. Líquido lavador	74
8.5.5. Esquema de la distribución interna de la torre.....	75
8.5.5. Cálculos	76
8.5.5. Fabricación de la torre de aspersión diseñada	77
8.5.6. Aspersores.....	78
8.5.7. Altura de la torre utilizada como depósito para el agua de lavado	81
8.5.8. Separador de gotas	82
8.5.9. Altura total de la torre	82
8.5.10. Pérdida de carga.....	83
8.5.11. Resumen de las características y las dimensiones finales de la torre de aspersión diseñada	83
Capítulo 9. Conducciones.....	85
9.1. Conducciones de aire	85
9.1.1. Sistema de conductos	86
9.1.1.1. Tramos 1-3 y 2-3.....	87
9.1.1.2. Tramos 3-4, 5-6, 7-8 y 9-10	88
9.1.2. Elemento de captación: Campana	88
9.1.3. Pérdidas de carga en el sistema de aspiración.....	91
9.1.4. Chimenea	97
9.1.5. Ventilador.....	101
9.2. Conducciones de agua.....	103
9.2.1. Lavador Venturi.....	104
9.2.2. Torre de aspersión	111
Capítulo 10. Instrumentación.....	121
10.1. Sensores de nivel.....	121
10.2. Sensores de pH y conductividad	121
10.3. Caudalímetros	122
10.4. Manómetros.....	123
Capítulo 11. Cálculos Eléctricos.....	125
11.1. Potencia requerida en la instalación	125
11.2. Elección de la sección del conductor	126
11.2.1. Dimensionamiento de conductores por caída de tensión	126

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

11.2.2. Dimensión de los conductores	129
11.2.3. Características del cable elegido	130
11.3. Cuadro eléctrico	131
Capítulo 12. Conclusiones	133
Capítulo 13. Bibliografía	135

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

Resumen del presupuesto	1
Presupuesto total	3
Presupuesto parcial	5

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DE PLANOS

Plano nº 1. Ubicación del sistema de tratamiento de gases.

Plano nº 2. Detalle de los equipos: ciclón, lavador Venturi y torre de aspersión.

Plano nº 3. Sistema con conducciones y accesorios de aspiración. Izq.: sin torre de aspersión. Dcha.: completo.

Plano nº 4. Esquema unifilar de la instalación.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Composición elemental de las plantas. [2]	4
Figura 2: Producción de fertilizantes N, P, K y NPK en España de 2005 a 2016.....	5
Figura 3: Localización Fábricas de Fertilizantes Españolas. [5]	6
Figura 4: Centro de producción en Sarrión. [6].....	8
Figura 5: Diagrama de procesos centro Sarrión. [6]	8
Figura 6: Fases del proceso de solubilización.....	9
Figura 7: Diagrama del proceso de solubilización. [6].....	10
Figura 8: Ejemplo de fertilizante complejo granulado.....	11
Figura 9: Fases del proceso de granulación.	12
Figura 10: Almacenamiento de producto a granel.	14
Figura 11: Diagrama del proceso de granulación. [6]	14
Figura 12: Diagrama del proceso de carga de camiones y envasado. [6]	15
Figura 13: Técnicas de tratamiento de gases residuales en relación al tipo de contaminante. [17]	28
Figura 14: Diagrama de flujo del sistema propuesto para el tratamiento de gases residuales..	41
Figura 15: Esquema de un ciclón. [18]	44
Figura 16: Gráfico generalizado de eficiencia del ciclón (Lapple, 1951). [19].....	46
Figura 17: Gráfica de la eficiencia teórica del ciclón en función de la relación d_p/d_{50}	51
Figura 18: Esquema de las dimensiones de una garganta Venturi.	57
Figura 19. Separador de gotas celular, CF80Max. [21]	72
Figura 20. Gráfica de la caída de presión al atravesar el separador de gotas en función del modelo y de la velocidad. [21]	73
Figura 21. Esquema del interior de la torre de aspersión.....	75
Figura 22. Distribución del fluido por el aspersor. [24].....	78
Figura 23. Ángulo de pulverización del modelo FC-FX en función de la presión del fluido y el diámetro del aspersor. [24].....	79
Figura 24. Distribución de los difusores en el área de la torre.	80
Figura 25. Esquema geométrico del cono generado por el difusor.....	80
Figura 26. Distribución superpuesta de los dos niveles de difusores.	81
Figura 27. Diámetros de tuberías de ventilación disponibles. [25].....	85
Figura 28. Esquema del sistema de aspiración.	86
Figura 29. Esquema de una campana.	89

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Figura 30. Dimensiones de la campana diseñada.	91
Figura 31. Curva característica del ventilador CRNT-TR/1251. [31].....	102
Figura 32. Diámetros disponibles de tubería de presión en polipropileno. [25]	104
Figura 33. Prestaciones y características electrobomba RFXA. [32]	108
Figura 34. Métodos de instalación de referencia. [40]	127
Figura 35. Intensidades admisibles en amperios para cables aislados con XLPE/EPR. [40].....	128
Figura 36. Datos técnicos cable ACEFLEX Eca. [41]	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Focos de emisión de la instalación.	23
Tabla 1 (continuación): Focos de emisión de la instalación.....	24
Tabla 2: Técnicas de tratamiento de partículas: restricciones e índice de eficacia.	30
Tabla 2 (continuación): Técnicas de tratamiento de partículas: restricciones e índice de eficacia.	31
Tabla 3: Límites y restricciones de aplicación de los lavadores húmedos.	33
Tabla 4. Mediciones puntuales de la concentración de emisión en el Foco 3 durante los cuatro trimestres del año 2017.	35
Tabla 5. Mediciones de la concentración del gas residual emitido en el Reactor 1.	37
Tabla 6. Características de la corriente residual de gas a tratar.	38
Tabla 7. Composición de la corriente de gas residual a tratar y sus límites de emisión.....	38
Tabla 8. Distribución del tamaño de partícula de la corriente de gas residual a tratar.....	39
Tabla 9: Eficacia de recolección en función del tipo de ciclón y del tamaño de partícula. [17] .	47
Tabla 10: Propiedades de la corriente gaseosa a tratar en las condiciones de trabajo.....	49
Tabla 11: Características dimensionales teóricas del ciclón.	49
Tabla 12: Rendimiento obtenido a partir de la Ecuación 5 en función del tamaño de partícula y d_{50}	50
Tabla 13: Concentración de partículas a la salida del ciclón en función del tamaño de partícula.	51
Tabla 14. Distribución del tamaño de partícula en la corriente gaseosa de salida del ciclón. ...	52
Tabla 15: Factor inercial de impacto y eficiencia de captación en función del tamaño de partícula para $V_G=90$ m/s y $R=0,00213$ l/m ³	63
Tabla 16: Eficiencia de captación en función del tamaño de partícula y concentración de partículas en la corriente de salida.	64
Tabla 17: Características teóricas del lavador Venturi.....	66
Tabla 18. Factor inercial de impacto y eficiencia de captación en función del tamaño de partícula recalculados para $v'_G=87,3$ m/s y $R'=2,67$ l/m ³	68
Tabla 19: Eficiencia de captación en función del tamaño de partícula y concentración de partículas en la corriente de salida.	69
Tabla 20. Características finales del lavador Venturi.	70
Tabla 21. Características teóricas de la torre de aspersion.	77
Tabla 22. Características finales de la torre de aspersion.....	84
Tabla 23. Valores recomendados para la velocidad de diseño de conductos. [26].....	86
Tabla 24. Pérdidas en la entrada de campanas rectangulares. [26]	90

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Tabla 25. Detalle de la instalación de aspiración.	100
Tabla 26. Detalle de las tuberías de agua.	117
Tabla 27. Detalle de las válvulas instaladas.	118
Tabla 27 (continuación). Detalle de las válvulas instaladas.	119
Tabla 28. Características de las bombas instaladas.	119
Tabla 29: Potencia requerida por los equipos.	126
Tabla 30. Parámetros de diseño de sección, sección según Norma UNE-HD 60364-5 y caída de tensión de la línea.	129
Tabla 31. Caída de tensión de la línea y sección comercial para el cable ACEFLEX.	131

Documento nº1:

MEMORIA

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Objeto y Justificación	1
1.1. Objeto general.....	1
1.2. Objetos parciales.....	1
1.3. Justificación	1
Capítulo 2. Introducción.....	3
2.1. Fertilizantes: descripción y aplicaciones	3
2.2. Situación actual del sector de los fertilizantes.....	5
Capítulo 3. Descripción de la Empresa.....	7
3.1. Fertinagro Biotech.....	7
3.2. Proceso productivo	7
3.2.1. Solubilización.....	9
3.2.2. Granulación	11
3.2.3. Envasado y carga de camiones a granel.....	15
Capítulo 4. Legislación Aplicable	17
4.1. Legislación en medidas de emisión.....	17
4.2. Legislación en medidas de inmisión.....	18
Capítulo 5. Autorización Ambiental Integrada.....	21
5.1. Antecedentes	21
5.2. Autorización Ambiental Integrada de la empresa	21
5.2.1. Descripción de la instalación.....	21
5.2.2. Consumos.....	22
5.2.3. Aguas residuales.....	22
5.2.4. Emisiones a la atmósfera	23
5.2.5. Emisiones de ruidos	25
5.2.6. Producción de residuos.....	25
Capítulo 6. Mejores técnicas disponibles.....	27
6.1. Visión general.....	27
6.2. Mejores Técnicas Disponibles para el tratamiento de gases residuales en la industria química.....	27
6.2.1. Técnicas de tratamiento de partículas.....	29
6.2.2. Técnicas de recuperación de compuestos inorgánicos: lavadores húmedos para la eliminación de gases	31

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Capítulo 7. Caracterización de los Gases a Tratar	35
7.1. Identificación de los gases a tratar.....	35
7.2. Caracterización del gas a tratar.....	36
Capítulo 8. Diseño del Lavador de Gases	41
8.1. Descripción del sistema propuesto	41
8.1.1. Elección de la primera etapa.....	41
8.1.2. Elección de la segunda etapa	42
8.1.3. Elección de la tercera etapa	43
8.2. Diseño del ciclón	44
8.2.1. Dimensiones geométricas	44
8.2.2. Revoluciones del gas dentro del ciclón	45
8.2.3. Tamaño de partícula con eficiencia de recolección del 50%	45
8.2.4. Eficacia de recolección	46
8.2.5. Pérdida de carga.....	47
8.2.6. Cálculos	47
8.2.7. Fabricación del ciclón diseñado	53
8.3. Diseño del colector húmedo de alta energía: lavador venturi.....	54
8.4.1. Sección de la garganta.....	54
8.4.2. Velocidad en la garganta.....	55
8.4.3. Relación de líquido a gas	55
8.4.4. Selección del líquido de lavado	55
8.4.5. Caída de presión.....	55
8.4.6. Tamaño de gota medio	56
8.4.7. Factor inercial de impacto.....	56
8.4.8. Eficiencia de recolección de partículas	56
8.4.9. Dimensiones geométricas	57
8.4.10. Consumo de energía	58
8.4.11. Razón de drenado del líquido lavador	58
8.4.12. Cálculos	59
8.4.13. Fabricación del lavador Venturi diseñado.....	66
8.5. Torre de aspersión	74
8.5.1. Diámetro de la torre.....	74
8.5.2. Tiempo de residencia	74

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

8.5.3. Altura de la torre	74
8.5.4. Líquido lavador	74
8.5.5. Esquema de la distribución interna de la torre.....	75
8.5.5. Cálculos	76
8.5.5. Fabricación de la torre de aspersión diseñada	77
8.5.6. Aspersores.....	78
8.5.7. Altura de la torre utilizada como depósito para el agua de lavado	81
8.5.8. Separador de gotas	82
8.5.9. Altura total de la torre	82
8.5.10. Pérdida de carga.....	83
8.5.11. Resumen de las características y las dimensiones finales de la torre de aspersión diseñada	83
Capítulo 9. Conducciones.....	85
9.1. Conducciones de aire	85
9.1.1. Sistema de conductos	86
9.1.1.1. Tramos 1-3 y 2-3.....	87
9.1.1.2. Tramos 3-4, 5-6, 7-8 y 9-10	88
9.1.2. Elemento de captación: Campana	88
9.1.3. Pérdidas de carga en el sistema de aspiración.....	91
9.1.4. Chimenea	97
9.1.5. Ventilador.....	101
9.2. Conducciones de agua.....	103
9.2.1. Lavador Venturi.....	104
9.2.2. Torre de aspersión	111
Capítulo 10. Instrumentación.....	121
10.1. Sensores de nivel.....	121
10.2. Sensores de pH y conductividad	121
10.3. Caudalímetros	122
10.4. Manómetros.....	123
Capítulo 11. Cálculos Eléctricos.....	125
11.1. Potencia requerida en la instalación	125
11.2. Elección de la sección del conductor	126
11.2.1. Dimensionamiento de conductores por caída de tensión	126

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

11.2.2. Dimensión de los conductores	129
11.2.3. Características del cable elegido	130
11.3. Cuadro eléctrico	131
Capítulo 12. Conclusiones	133
Capítulo 13. Bibliografía	135

CAPÍTULO 1. OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

1.1. OBJETO GENERAL

El presente Trabajo Final de Máster (TFM) tiene como objeto el diseño de un sistema de tratamiento de gases residuales en el área de fabricación de fosfato simple de la empresa Fertinagro Biotech, ubicada en el municipio de Sarrión (Teruel). El objetivo principal de este diseño es lograr el cumplimiento de los límites legales de emisión de contaminantes atmosféricos establecidos en la autorización ambiental integrada de la empresa.

Para llevar a cabo el diseño del sistema de tratamiento de gases residuales previamente se realizará un estudio de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y una caracterización del gas a tratar. Una vez elegidos los equipos apropiados se realizará el diseño de los mismos, así como su elección en catálogo.

También es objeto de este trabajo la elaboración de los planos de los equipos y el plano de ubicación en planta. Por último, se presentará el presupuesto del sistema de tratamiento de gases diseñado.

1.2. OBJETOS PARCIALES

Entre los objetivos parciales de este trabajo se encuentra el estudio de las Mejores Técnicas Disponibles para el tratamiento de los gases residuales con el fin de realizar la elección de los equipos apropiados en función de la caracterización del gas a tratar. También es objeto de este trabajo el diseño de los equipos a partir de las características del gas residual y el estudio de la ubicación de los equipos en planta.

Tras el diseño de los equipos depuradores, la finalidad es proyectar los elementos auxiliares requeridos para el funcionamiento del sistema de tratamiento de gases. Entre estos elementos se incluyen: las conducciones de aire, la elección del ventilador y el planteamiento de la chimenea, así como las conducciones hidráulicas, accesorios y equipos de bombeo.

También será objeto del trabajo, la realización de los planos de ubicación y detalle de los equipos, y el presupuesto del sistema diseñado.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente TFM se enmarca dentro de la normativa de calidad del aire y protección de la atmósfera, potenciándose la utilización de las mejores técnicas disponibles para la prevención y minimización del impacto ambiental enfocadas al tratamiento y gestión de aguas y gases residuales y a la disminución de la cantidad de residuos generados.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Con este trabajo final de máster se persigue la adquisición de los conocimientos necesarios para llevar a cabo el control y corrección de las emisiones atmosféricas en el ámbito industrial, así como aunar los conocimientos técnicos con el compromiso medioambiental, ético y social.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN

La actividad principal de la empresa objeto del TFM es la fabricación de fertilizantes. Por ello, en este capítulo se va a realizar una descripción de los fertilizantes y sus aplicaciones y una breve presentación de la situación actual del sector de los fertilizantes.

2.1. FERTILIZANTES: DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES

Un producto fertilizante es un producto utilizado en agricultura o jardinería que, por su contenido en nutrientes, facilita el crecimiento de las plantas, aumenta su rendimiento y mejora la calidad de las cosechas o que, por su acción específica, modifica, según convenga, la fertilidad del suelo o sus características físicas, químicas o biológicas. [1]

Las plantas necesitan dieciséis elementos indispensables para su desarrollo, procedentes del aire, del agua y del suelo. Estos elementos son los siguientes:

- Carbono (C)
- Hidrógeno (H)
- Oxígeno (O)
- Nitrógeno (N)
- Fósforo (P)
- Potasio (K)
- Calcio (Ca)
- Magnesio (Mg)
- Azufre (S)
- Hierro (F)
- Manganeso (Mn)
- Zinc (Zn)
- Cobre (Cu)
- Boro (B)
- Molibdeno (Mo)
- Cloro (Cl)

Estos dieciséis nutrientes se dividen en dos categorías en función de la cantidad necesaria para el crecimiento de la planta:

- **Macronutrientes:** la planta los necesita en grandes cantidades. Se clasifican en :
 - Nutrientes primarios: nitrógeno, fósforo y potasio.
 - Nutrientes secundarios: magnesio, azufre y calcio.
- **Micronutrientes:** aunque en cantidades muy inferiores, son clave para el desarrollo óptimo de la planta.

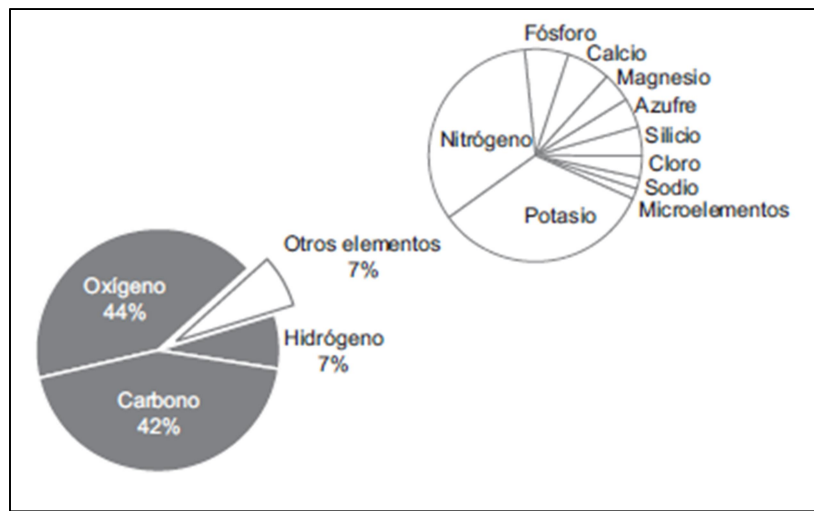


Figura 1: Composición elemental de las plantas. [2]

El contenido en macronutrientes primarios del fertilizante es la base para la distinción entre los diferentes tipos de fertilizantes químicos:

- **Abono simple:** solo contiene uno de los nutrientes primarios (N, P o K).
- **Abono compuesto/complejo:** contiene al menos dos de los nutrientes primarios (NPK, NP, NK o PK).

Los suelos pueden tener carencias en nutrientes debido a su naturaleza o presentar deficiencias en los mismos causadas por el cultivo continuado durante años. Por estas razones, es indispensable la aplicación de fertilizantes con el fin de lograr un desarrollo óptimo de los cultivos. También es necesario el uso de fertilizantes si se realiza un cultivo de variedades que requieren rendimientos más altos que los que puede aportar el suelo por su composición natural.

A continuación, se enumeran las ventajas más relevantes de la aplicación de fertilizantes [3]:

- El uso de los fertilizantes garantiza la productividad y calidad de los cultivos, logrando un incremento en el contenido de nutrientes de las cosechas.
- Gracias a la aplicación de fertilizantes se evita el incremento de la superficie agrícola debido a que se optimiza el rendimiento de las actuales superficies.

- Una aplicación eficiente, racional y responsable de los fertilizantes permite la conservación del suelo e impide su degradación gracias a la aportación de los elementos esenciales para la fertilidad del suelo.

2.2. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR DE LOS FERTILIZANTES

Según datos de la Asociación Internacional de Fertilizantes (IFA), la producción mundial de fertilizantes está focalizada en China (aprox. el 40% de la producción), Federación de Rusia, India, Canadá y Estados Unidos.

En España, la industria de los fertilizantes ha experimentado un importante crecimiento desde los años 60, así como el consumo de fertilizantes en la agricultura.

En la gráfica de la Figura 2 se muestra la evolución de la producción de fertilizantes simples y complejos desde 2005 hasta 2016 en España [4].

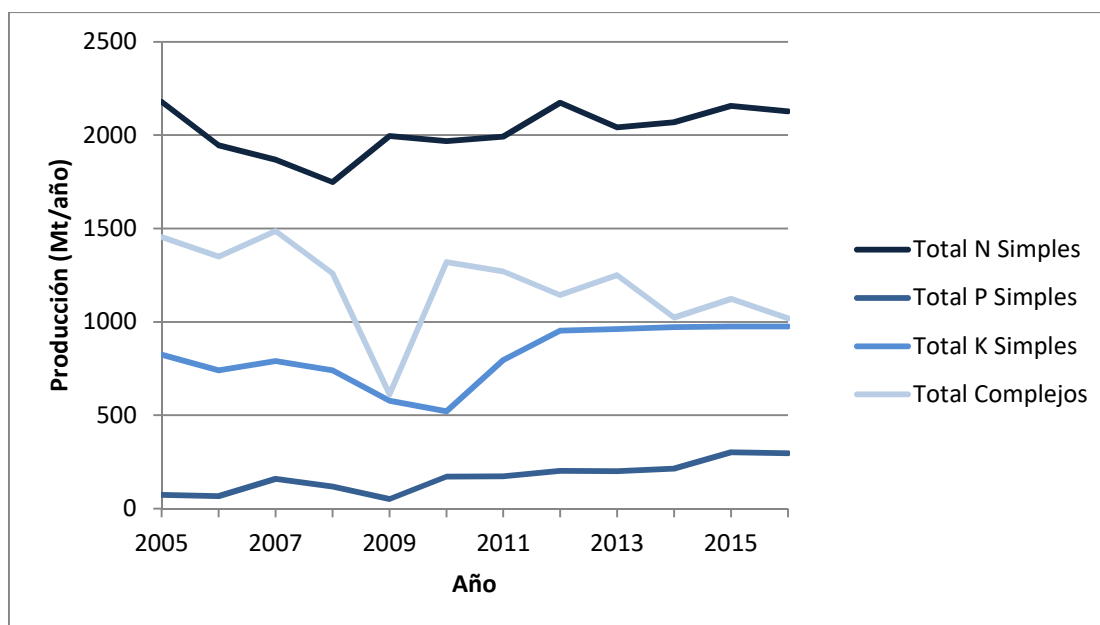


Figura 2: Producción de fertilizantes N, P, K y NPK en España de 2005 a 2016.

Tal y como se puede observar en la gráfica de la Figura 2, la producción de fertilizantes en España destaca en la fabricación de nitrogenados simples y abonos complejos.

En la Figura 3 se presenta la distribución territorial de las fábricas de fertilizantes en España.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)



Figura 3: Localización Fábricas de Fertilizantes Españolas. [5]

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

3.1. FERTINAGRO BIOTECH

Fertinagro Biotech es una empresa española de fertilizantes dedicada a la producción y comercialización de soluciones de nutrición vegetal, la cual forma parte de un conjunto de empresas que componen el Grupo Térvalis, fundado en 1986.

A lo largo de los últimos años se han hecho importantes inversiones en I+D y aportado soluciones técnicas innovadoras relacionadas con la nutrición vegetal, siempre del lado de los objetivos clave para Fertinagro como son innovación y desarrollo. Es por ello que actualmente cuenta con el catálogo de productos más completo del mercado, con más de 300 referencias.

Fertinagro Biotech posee una capacidad de producción de 2 millones de toneladas anuales y sus plantas de producción se localizan en España, Portugal y Francia.

Los compromisos de la empresa son para con:

- El cliente, el agricultor, ofreciéndole los mejores productos al mejor coste.
- El distribuidor, garantizándole más negocio para lograr un eficiente servicio.
- La sostenibilidad, siempre trabajando con productos sostenibles y respetando el medio ambiente.
- La competitividad, logrando enmarcarse por delante de los competidores gracias a las nuevas tecnologías.
- La reinversión, pensando en sus accionistas.
- Las personas ya que gracias a la Fundación Térvalis se generan puestos de trabajo para personas discapacitadas.

3.2. PROCESO PRODUCTIVO

El centro de producción objeto de este TFM es el centro productivo ubicado en Sarrión (Teruel). Sus áreas productivas son la solubilización y la fabricación de fertilizantes granulados simples y complejos. En la actualidad cuenta con una capacidad de producción de 230.000 T/año.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)



Figura 4: Centro de producción en Sarrión. [6]

Además de las dos áreas productivas mencionadas anteriormente, el centro cuenta con una instalación de envasado y una de carga de camiones de producto a granel.

En la Figura 5 se puede observar el diagrama de procesos y flujos del centro.

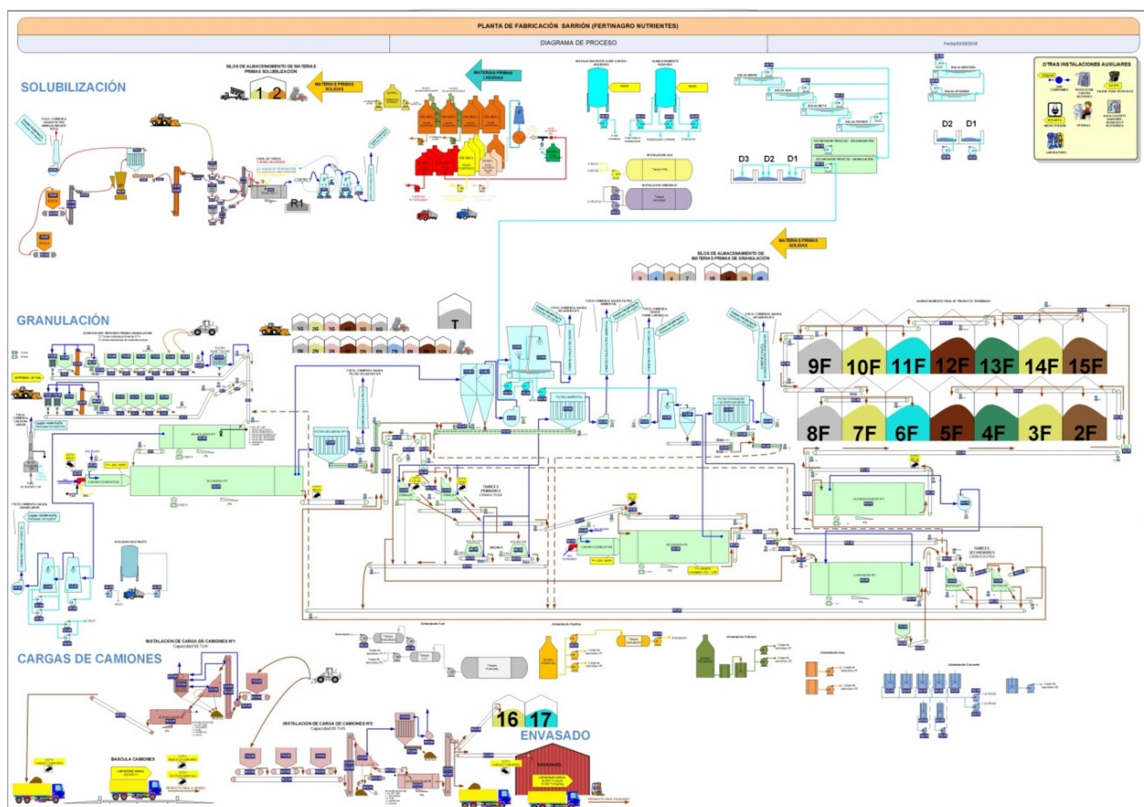


Figura 5: Diagrama de procesos centro Sarrión. [6]

3.2.1. Solubilización

En este proceso productivo se transforman sales ricas en nutrientes no asimilables por los organismos vegetales en formas asimilables. Los productos obtenidos se utilizan como materia prima en los procesos de granulación de las diferentes plantas del grupo. Dos de los productos finales producidos en este proceso son superfosfato simple (SSP) y superfosfato triple (TSP).

Las materias primas sólidas que se utilizan son fosfato cal roca (roca fosfórica), magnesita y óxido de potasio. Como materias líquidas se usan ácido sulfúrico, ácido sulfúrico diluido, ácido fosfórico y agua de lavado de las torres de tratamiento de gases del solubilizador.

En el proceso de producción estas materias primas son introducidas en un solubilizador, un tambor rotativo, en la cantidad adecuada para la fórmula que se quiere fabricar, y son atacadas con ácido sulfúrico o fosfórico. El aporte de agua necesario para el proceso se realiza con el agua de lavado de la torre de captación de gases del solubilizador.



Figura 6: Fases del proceso de solubilización.

Las fases del proceso de solubilización son:

- Almacenamiento de materias primas: las materias primas sólidas se almacenan en silos de hormigón. El ácido sulfúrico y el ácido fosfórico se almacenan en depósitos destinados a tal uso. El agua de lavado de las torres se acumula en la parte inferior de las mismas.
- Molienda de materias primas sólidas: la roca fosfórica debe molerse previamente a su introducción al solubilizador. Para llevar a cabo tal labor se utiliza un molino pendular, el cual logra una molienda de hasta 125 μm . Este molino tiene un sistema de aspiración propia que canaliza el aire captado hasta un filtro de mangas que elimina las partículas antes de expulsarlo al exterior.
- Dosificación de materias primas: esta dosificación se lleva a cabo con unas tolvas dosificadoras que constan de un pesaje dinámico que logra dosificar la cantidad necesaria para cada fórmula. Se dispone de una tolva independiente por cada una de las materias primas a dosificar.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

- **Solubilización:** esta fase del proceso se realiza dentro de un reactor (tambor rotatorio). En el reactor se añaden las proporciones adecuadas de ácidos y aguas de proceso sobre las materias primas sólidas generando la solubilización de las mismas. Se trata de una reacción química exotérmica que alcanza temperaturas de 100°C.
 - Debido a la reacción química producida, los gases generados contienen los siguientes contaminantes:
 - Ácido clorhídrico (HCl)
 - Ácido fluorhídrico (HF)
 - Partículas
 - Los gases generados en el reactor se conducen a una instalación de lavado previamente a su salida al exterior.
- **Almacenamiento temporal del producto:** es necesario que el producto generado en el solubilizador se deje reposar en un silo durante un periodo de tiempo comprendido entre una y seis semanas para lograr el endurecimiento del mismo.

El área de solubilización, tal y como se puede observar en la Figura 7, cuenta con un reactor (R1) en el que se realiza la reacción de solubilización, tres tolvas dosificadoras y un molino pendular; de ahora en adelante esta área se denominará Línea 1. Actualmente se va a construir una nueva línea de proceso, Línea 2, con el objetivo de aumentar la producción en esta área de fabricación, así como facilitar la realización de las tareas de mantenimiento de las líneas sin detener la fabricación.

La Línea 2 tendrá unas características similares a la Línea 1, por lo que se compondrá de un reactor (R2) y tres tolvas dosificadoras.

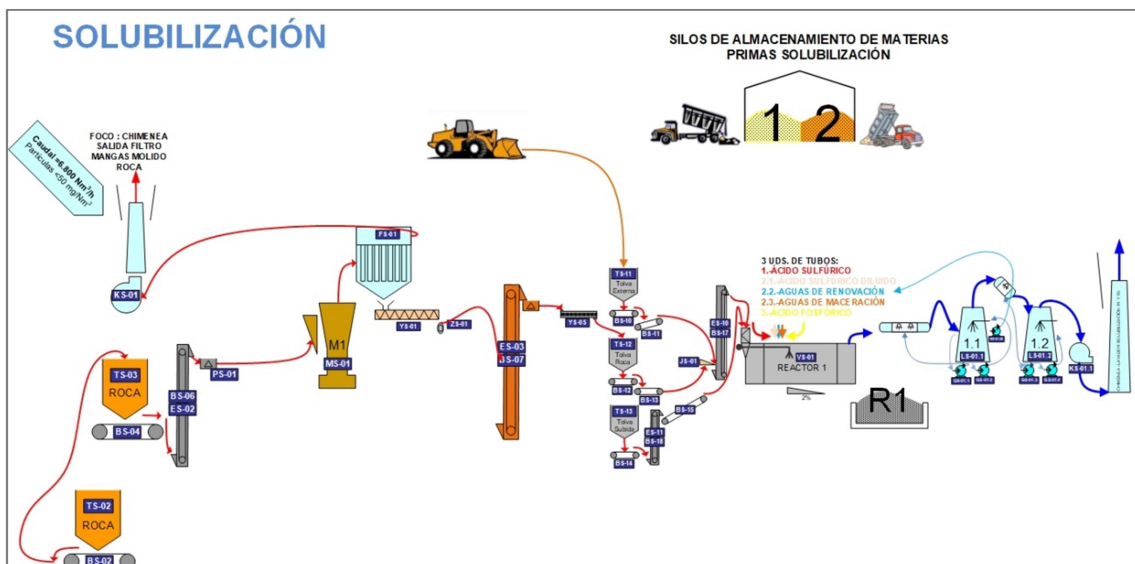


Figura 7: Diagrama del proceso de solubilización. [6]

3.2.2. Granulación

En esta área productiva se fabrican los abonos granulados. La instalación está adecuada para producir cualquier fórmula de fertilizante, ya sean simples o complejos.



Figura 8: Ejemplo de fertilizante complejo granulado.

La granulación se realiza en un tambor rotatorio, denominado granulador, donde se mezclan las materias primas sólidas con líquidos para lograr la reacción química y conseguir dicha granulación. Una vez el producto abandona el reactor atraviesa diferentes etapas: secado, enfriado, tamizado, enfriado, cribado y acondicionado.

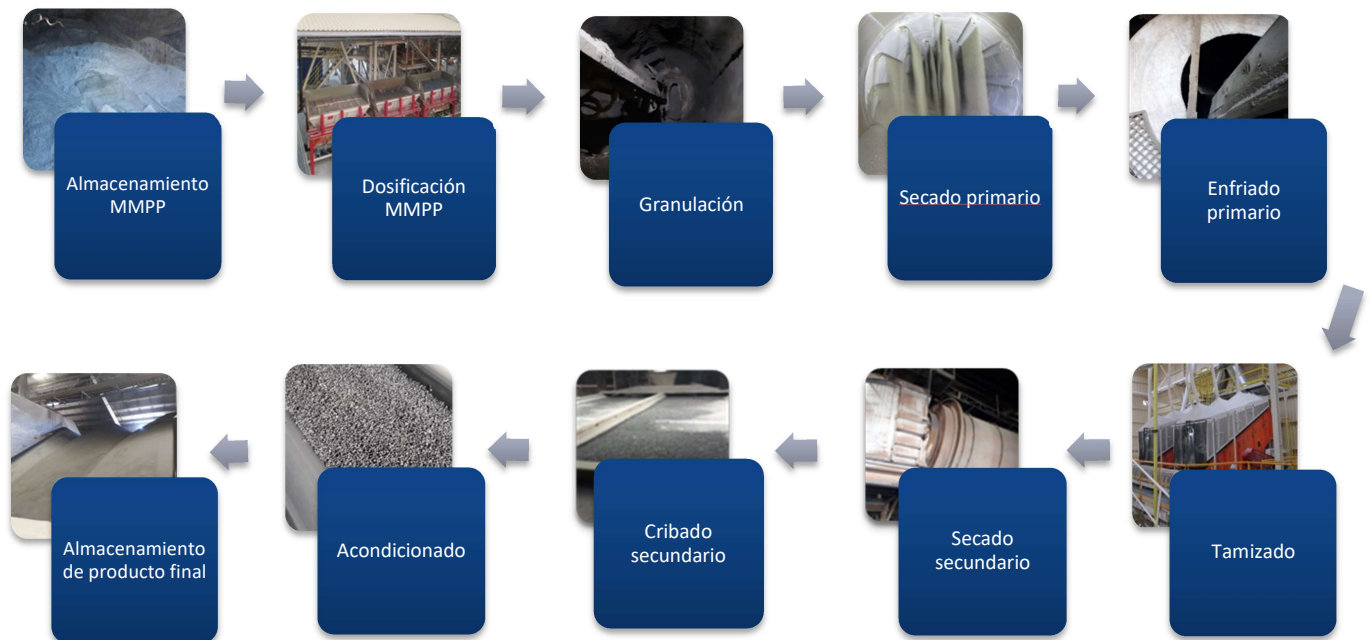


Figura 9: Fases del proceso de granulación.

A continuación, se detallan cada una de las etapas del proceso de granulación:

- Almacenamiento de materias primas: al igual que en el proceso de solubilización, las materias primas sólidas son almacenadas en silos de hormigón y las materias líquidas en depósitos adecuados para tal uso. Las aguas de proceso y de lavado de gases se almacenan en decantadores para su posterior uso en granulación.
- Dosificación de materias primas: la instalación cuenta con trece tolvas dosificadoras, dos de las cuales poseen un molino en línea, que permite realizar la molienda de alguna de las materias primas previa a la dosificación. Estas tolvas cuentan con un pesaje dinámico que permite dosificar el porcentaje adecuado para cada fórmula.
- Granulación: las materias primas sólidas se introducen en un reactor donde son atacadas químicamente con las materias primas líquidas en la proporción que requiera la fórmula fabricada. Las materias primas líquidas utilizadas son las siguientes:
 - Ácido sulfúrico al 98%
 - Ácido fosfórico
 - Amoníaco anhidro
 - Vapor de agua

- Agua de procesos: almacenada en decantadores o en balsas en función de su procedencia.

Debido a la reacción química generada dentro del granulador los gases producidos contienen los siguientes contaminantes:

- Ácido clorhídrico (HCl)
- Ácido fluorhídrico (HF)
- Amoniac (NH_3)
- Metales (Boro y Zinc)
- Partículas

Estos gases son conducidos a una instalación de depuración de gases que consta de dos etapas de lavado.

- Secado: el material granulado se conduce a un secadero. El secadero es un tambor rotatorio por el que se hace circular aire caliente y que cuenta con palas en su interior para generar el efecto cortina en el material transportado en su interior. El aire se calienta en una cámara de combustión alimentada con gas natural o con la caldera de biomasa, alcanzando temperaturas de hasta 400°C. Se utiliza para eliminar el exceso de humedad que se ha añadido previamente para lograr la granulación.
- Enfriado: el material seco se introduce en un tambor rotatorio por el que circula aire a temperatura ambiente. Esta etapa se realiza con el fin de endurecer el grano al disminuir la temperatura del mismo y favorecer el posterior tamizado del producto.
- Tamizado: el abono se introduce en unas cribas vibrantes con gran inclinación, entre 45-55°, que dividen el grano en tres fracciones: gruesa, fina y comercial. La fracción fina se reconduce de nuevo al granulador, como material reciclado. La fracción gruesa es molida por unos molinos en línea previamente a su reintroducción en el granulador como material reciclado. La fracción comercial continúa las fases del proceso.
- Secado secundario: la fracción comercial separada en el cribado secundario se conduce a un secador rotatorio donde se eliminara el exceso de humedad que no haya podido absorberse en el primer secado.
- Cribado secundario: con el fin de aumentar la calidad granulométrica del producto final, se realiza un cribado secundario del material aceptado previamente como bueno por sus dimensiones. Este cribado se realiza en unas cribas de alta eficiencia. Estas cribas también son vibrantes pero la inclinación de sus telas es aproximadamente de 10°. En esta etapa también obtenemos tres fracciones; en este caso, tanto la fracción fina como la gruesa son reconducidas directamente al granulador.
- Acondicionado: previamente al almacenamiento del producto en los silos, este es conducido a un tambor acondicionador en el cual se añaden aditivos antiapelmazantes y colorantes.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

- Almacenamiento de producto final: el producto final se almacena al menos durante 24 horas en los silos de la nave de fabricación, previamente a ser envasado o cargado a granel.



Figura 10: Almacenamiento de producto a granel.

En la etapa de secado el gas es conducido a unos ciclones previamente al lavado de los gases. En el enfriador el aire de salida es depurado en filtros de mangas que separan el polvo arrastrado. Hay diversas captaciones de polvo generales distribuidas por la zona de granulación. El polvo separado en los diferentes filtros de mangas es reintroducido en el granulador como materia prima.

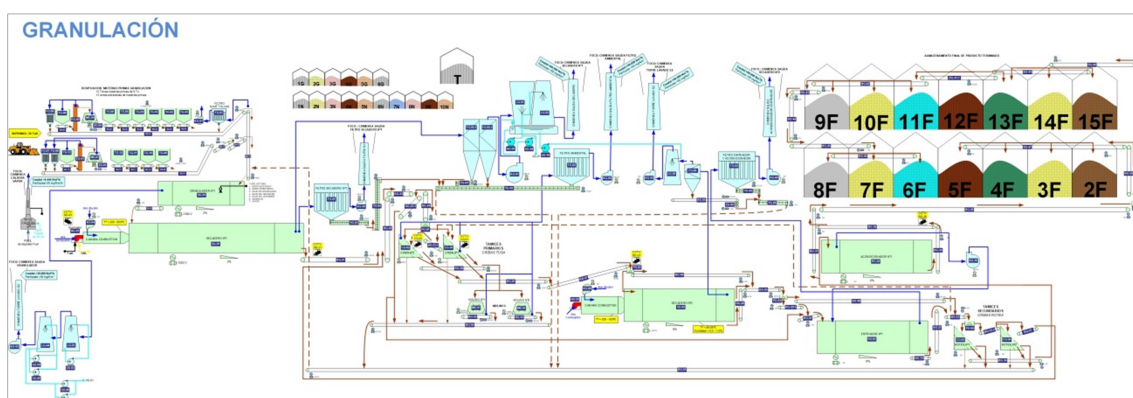


Figura 11: Diagrama del proceso de granulación. [6]

CAPÍTULO 4. LEGISLACIÓN APLICABLE

En el presente capítulo se va a presentar la legislación relativa a contaminación atmosférica aplicable a la empresa objeto del TFM, diferenciada en medidas de emisión y medidas de inmisión. Pese a que solo se va a exponer la legislación referente a la contaminación atmosférica se debe tener en cuenta que la empresa se encuentra dentro del marco de más legislaciones, no obstante éstas no son de aplicación para el presente trabajo.

4.1. LEGISLACIÓN EN MEDIDAS DE EMISIÓN

- **Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico. [7]**

Presenta una postura del estado a favor del medio ambiente, teniendo por objeto la prevención, vigilancia y corrección de la contaminación atmosférica.

Es desarrollada por el Decreto 833/1975.

- **Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. [8]**

Esta Ley tiene por objeto evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Se introduce la Autorización Ambiental Integrada (AAI) como una autorización que permite la explotación de una instalación bajo determinadas condiciones que protegen el medio ambiente y la salud de las personas. En este documento aparecen los límites de emisión de contaminantes atmosféricos para la instalación.

Para optar a la concesión de la Autorización Ambiental Integrada se ha de hacer uso en la instalación de las Mejores Técnicas Disponibles en materia de medio ambiente.

Instaura medidas de control e inspección para garantizar el cumplimiento de la ley así como sanciones cuya medida variará en función de la gravedad de las infracciones cometidas.

Publica un inventario de emisiones y fuentes contaminantes en el que aparecerán los datos de las emisiones anuales realizadas por cada instalación. Esta ley también exige a cada Comunidad Autónoma disponer de información sobre las principales emisiones y focos de las mismas, y de todos los datos que deben constar en las Autorizaciones Ambientales Integradas de cada instalación.

- **Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Deroga la Ley 38/1972. [9]**

Se presenta como una actualización de las leyes previas en materia medio ambiental.

Potencia la utilización de las mejores técnicas disponibles y la realización por parte de las empresas de auditorías ambientales, sistemas de gestión medioambiental...

Obliga a la inspección y vigilancia del cumplimiento de la ley y la fijación de sanciones en caso contrario.

En el Artículo 13, establece tres grupos diferentes de actividades potencialmente contaminantes: A, B y C. En función del grupo al que pertenezca la actividad se establece la rigurosidad de los requisitos a los que estarán sujetos sus controles de emisiones.

En el Anexo IV se enumeran las actividades potencialmente contaminantes que han de informar de sus emisiones junto con sus límites de emisiones con el fin de generar el inventario nacional.

- **Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación. [10]**

Incluye en sus Anexos un listado de las categorías de actividades e instalaciones a las que es de aplicación esta ley, así como una lista de sustancias contaminantes para atmósfera y agua y los aspectos a tener en cuenta cuando se determinen las mejores técnicas disponibles.

- **Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de protección del ambiente atmosférico. [11]**

Concreta las competencias administrativas contra la contaminación atmosférica.

Hace ahínco en el control de las emisiones. Para ello, cataloga las actividades industriales potencialmente contaminadoras de la atmósfera, sus niveles de emisión y el régimen especial que han de cumplir dichas actividades.

Crea las Entidades Colaboradoras de la Administración (ECAS) con el fin de contrastar el cumplimiento de las condiciones e inspecciones impuestas en el funcionamiento de las actividades industriales potencialmente contaminadoras.

Por último, desarrolla el régimen sancionador para cualquier infracción cometida.

- **Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. [12]**

4.2. LEGISLACIÓN EN MEDIDAS DE INMISIÓN

- **Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de protección del ambiente atmosférico. [11]**

En cuanto a la vigilancia de la calidad del aire establece los niveles de inmisión y crea una Red Nacional de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica.

Define situaciones admisibles, zonas de atmósfera contaminada y situaciones de emergencia para dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas y monóxido de carbono, en función de cual sea el nivel de superación de los límites establecidos de contaminantes.

- **Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. [13]**

Fija nuevos niveles de inmisión y valores límite de protección para la salud humana y para la vegetación. Establece umbrales de información y umbrales de alerta en función de los niveles de inmisión, así como indicadores de exposición.

Describe los métodos para evaluar las concentraciones de los contaminantes.

Añade valores de referencia de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas PM_{2,5} y PM₁₀, plomo, benceno, monóxido de carbono, ozono troposférico, arsénico, cadmio, níquel y benzo(a)pireno.

- **Real Decreto 39/2017, de 27 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. [14]**

Añade normas de calidad para otros hidrocarburos aromáticos policíclicos y mercurio gaseoso.

Se decreta la ubicación de los puntos de medición para evaluar la calidad del aire ambiente y se fijan las normas referentes a los métodos de referencia y la validación de datos.

CAPÍTULO 5. AUTORIZACIÓN AMBIENTAL

INTEGRADA

Tal y como se ha introducido en el capítulo anterior, con la ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación se implanta la AAI, como una autorización necesaria para poder realizar la actividad industrial. Esta autorización certifica que la explotación se lleva a cabo bajo unas determinadas condiciones que garantizan la protección del medio ambiente. A continuación se presentan los detalles de la autorización de la empresa objeto de estudio.

5.1. ANTECEDENTES

La Autorización Ambiental Integrada fue otorgada a Agrimartín Fertilizantes, S.L. (actualmente Fertinagro Biotech) – Centro de Sarrión (Teruel) en el año 2008 [15]. En esa etapa la actividad industrial era la fabricación de abono complejo NPK granulado, de fertilizantes líquidos y sólidos de alta solubilidad y la solubilización.

Actualmente, ya no se fabrican fertilizantes líquidos y sólidos de alta solubilidad en esta planta pues esta línea de negocio se ha transferido a otro de los centros de producción de Fertinagro Biotech.

Desde el año 2008, la Autorización Ambiental Integrada ha sufrido ocho modificaciones puntuales debido al aumento de focos de emisiones atmosféricas, la instalación de una caldera de vapor, la cual ha rectificado su combustible principal, y una caldera de biomasa. Asimismo, han sido causa de estas ocho modificaciones la incorporación y posterior desestimación de algunas materias primas, así como la gestión de residuos peligrosos y no peligrosos.

5.2. AUTORIZACIÓN AMBIENTAL INTEGRADA DE LA EMPRESA

5.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación ocupa una superficie de 81.568 m². Está situada en el término municipal de la localidad de Sarrión, provincia de Teruel, en el sector industrial “La Escaleruela”.

Se encuentra dividida en tres áreas productivas claramente diferenciadas:

- Planta de granulación: con una producción máxima de 200.000 T/año de fertilizantes granulados a granel y envasados.
- Planta de fabricación de fertilizantes líquidos y sólidos de alta solubilidad: producción máxima de 10.000 T/año de fertilizantes líquidos y cristalinos.

- Planta de solubilización: para la transformación de sales la producción máxima es de 30.000 T/año.

5.2.2. CONSUMOS

Materias primas

El consumo total máximo de materias primas para la planta es de 282.000 T/año. Los consumos individuales de cada materia prima varían anualmente en función de la cantidad que se fabrique de cada fórmula de fertilizante.

En la planta de solubilización las materias primas que se utilizan son las siguientes:

- Ácido sulfúrico
- Fosfato cal roca
- Magnesita
- Ácido fosfórico
- Óxido de potasio

El consumo anual de estas materias primas alcanza las 44.800 T.

Combustibles

Los combustibles utilizados en el centro son los siguientes:

- Biomasa de origen vegetal, serrín, virutas y recortes de madera, envases de madera y madera. Son utilizados para el proceso de secado y granulación (12.000 T/año).
- Gasoil B, que se usa como suministro de los vehículos internos del centro (274.588 l/año).
- Gas natural, para la caldera de vapor y tan solo se hace uso de él en el resto de instalaciones como complemento en caso de requerimiento energético en el proceso de secado (1.882 T/año).
- Fuel-oil; sólo se requiere su uso en caso de emergencia o falta de suministro.

Agua

El consumo de agua de red es de 22.383 m³/año. Su uso se destina a oficinas y vestuarios y a la renovación del agua de lavado de las diferentes instalaciones de lavado de gases.

Electricidad

La energía eléctrica se emplea para iluminación y para el funcionamiento de todos los equipos de producción. El consumo anual es de 8.712.414 kWh/año.

5.2.3. AGUAS RESIDUALES

La instalación no realiza ningún vertido de agua residual. El agua residual tanto de producción como de oficinas y vestuarios es almacenada en balsas adecuadas para tal uso. En caso de lluvia, los primeros litros son almacenados y cuando el agua cumple las características adecuadas se desvía al exterior de las instalaciones.

El agua residual almacenada en las balsas se reutiliza en el proceso de producción.

5.2.4. EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Como industria química inorgánica de producción de fertilizantes NPK se encuentra dentro del catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera, en concreto pertenece al grupo A con código 04 04 07 00.

La instalación presenta once focos, nueve de ellos pertenecen al Grupo A, uno al Grupo B y el último al Grupo C.

La empresa ha de superar Inspecciones oficiales realizadas por ECA: en los focos de Grupo A cada dos años, en el foco de Grupo B cada tres años y en el foco de Grupo C cada cinco años.

Además, se han de realizar mediciones de autocontrol trimestralmente en los focos del Grupo A y anualmente en el foco de Grupo B.

Si la instalación no contara con la certificación ISO 14001, los autocontroles en los focos del Grupo A deberían realizarse cada quince días.

Los focos de la instalación se presentan en la Tabla 1, indicando límites de emisión, grupo al cual pertenecen y características de los mismos.

Tabla 1: Focos de emisión de la instalación.

FOCO	GRUPO	LÍMITES mg/Nm ³		CARACTERÍSTICAS
FOCO 1 CAPTACIÓN GRANULADOR	A	Partículas: 50		Altura chimenea: 23,5 m
		HCl: 15		Diámetro: 0,95 m
		HF: 5		Sistema depuración: lavador de gases con dos etapas de lavado.
		NH ₃ : 60		
		Metales (B+Zn): 1		
FOCO 2 CAPTACIÓN TRÓMEL DE SECADO 1	A	B ó B+G	B+F	Altura chimenea: 19 m
		CO: 150	CO: 150	Diámetro: 1 m
		NO _x : 400 (medido como NO ₂)	NO _x : 400 (medido como NO ₂)	Sistema depuración: ciclones y lavador de gases.
		SO ₂ : 30	SO ₂ : 65	Los límites varían en función del combustible utilizado: B-Biomasa G-Gas natural F-Fuel-oil
		Partículas: 50	Partículas: 50	
		HCl: 15	HCl: 15	
		HF: 5	HF: 5	
		NH ₃ : 60	NH ₃ : 60	
		Metales (B+Zn): 1	Metales (B+Zn): 1	
FOCO 3 CAPTACIÓN SOLUBILIZACIÓN	A	Partículas: 50		Altura chimenea: 20 m
		HCl: 15		Diámetro: 0,7 m
		HF: 5		Sistema depuración: Scrubber.
FOCO 4 CAPTACIÓN ENFRIADOR PLANTA GRANULACIÓN	A	Partículas: 50		Altura chimenea: 8,5 m
				Diámetro: 0,95 m
				Sistema depuración: Filtro de mangas.

Tabla 1 (continuación): Focos de emisión de la instalación.

FOCO	GRUPO	LÍMITES mg/Nm ³		CARACTERÍSTICAS
FOCO 5 CAPTACIÓN GENERAL POLVO EN SECCIÓN GRANULACIÓN	A	Partículas: 50		Altura chimenea: 12 m
				Diámetro: 0,8 m
				Sistema depuración: Filtro de mangas.
FOCO 6 CAPTACIÓN ACONDICIONADOR	A	Partículas: 50		Altura chimenea: 9 m
				Diámetro: 1,3 m
				Sistema depuración: Filtro de mangas.
FOCO 7 CAPTACIÓN MOLINO PENDULAR ROCA FOSFORICA	A	Partículas: 50		Sistema depuración: Filtro de mangas.
FOCO 8 CALDERA DE VAPOR	C	G	F	Altura chimenea: 8 m
		CO: 200	CO: 200	Diámetro: 0,55 m
		NO _x : 616 medido como NO ₂	NO _x : 616 (medido como NO ₂)	Los límites varían en función del combustible utilizado: G-Gas natural F-Fuel-oil
		SO ₂ : 850	SO ₂ : 850	
		-	Partículas: 50	
FOCO 9 CHIMENEA DE ARRANQUE DE LA CALDERA DE BIOMASA	B	CO: 625		
		NO _x : 616 (medido como NO ₂)		
		Partículas: 150		
FOCO 10 CAPTACIÓN COMPLEMENTARIA DE LOS GASES DEL TRÓMEL DE SECADO 1	A	B ó B+G	B+F	Altura de chimenea: 13,6 m
		CO: 150	CO: 150	Diámetro: 0,95 m
		NO _x : 400 (medido como NO ₂)	NO _x : 400 (medido como NO ₂)	Sistema de depuración: filtro de mangas.
		SO ₂ : 30	SO ₂ : 65	Los límites varían en función del combustible utilizado: B-Biomasa G-Gas natural F-Fuel-oil
		Partículas: 50	Partículas: 50	
		HCl: 15	HCl: 15	
		HF: 5	HF: 5	
		NH ₃ : 60	NH ₃ : 60	
Metales (B+Zn): 1	Metales (B+Zn): 1			
FOCO 11 CAPTACIÓN DE LOS GASES DE TRÓMEL DE SECADO 2	A	CO: 60		Altura de chimenea: 13,6 m
		NO _x : 325 (medido como NO ₂)		Diámetro: 0,95 m
		SO ₂ : 72		Sistema de depuración: lavador de gases
		Partículas: 50		
		HCl: 15		
		HF: 5		
		NH ₃ : 60		
		Metales (B+Zn): 1		

5.2.5. EMISIONES DE RUIDOS

El nivel de ruido máximo permitido en el exterior de la instalación es de 75 dB(A), durante el día, y de 65 dB(A), durante la noche. Anualmente se realizan mediciones de ruido por un organismo competente.

5.2.6. PRODUCCIÓN DE RESIDUOS

Los residuos peligrosos generados durante la explotación de la actividad industrial son los siguientes:

- Envases plásticos contaminados.
- Productos químicos de laboratorio, así como los envases de los mismos.
- Material absorbente contaminado.
- Residuos de tóner de impresión.
- Filtros de aceite.
- Envases metálicos contaminados.
- Grandes envases a granel que contienen o han contenido restos de sustancias peligrosas.
- Tubos fluorescentes.
- Equipos eléctricos y electrónicos desechados.
- Aceites de motor.
- Baterías de plomo.

La cantidad anual generada de estos residuos asciende a 7,2 T.

La generación de residuos no peligrosos alcanza una suma más elevada, llegando a generar 121 T/año. Entre los residuos no peligrosos se encuentran:

- Envases de plástico.
- Chatarra.
- Papel y cartón.
- Envases de madera.
- Grandes contenedores a granel no contaminados con sustancias peligrosas.
- Neumáticos fuera de uso.
- Materiales de caucho, como cintas transportadoras.
- Filtros de mangas.
- Residuos asimilables a urbanos.

CAPÍTULO 6. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

Las Mejores Técnicas Disponibles son las tecnologías aplicables de desarrollo y explotación de actividades más eficaces que permiten lograr la protección del medio ambiente y la salud de las personas. Estas técnicas son desarrolladas para cada tipo de sector industrial buscando siempre su viabilidad de aplicación, tanto económica como técnicamente.

6.1. VISIÓN GENERAL

Dentro del documento BREF Mejores Técnicas Disponibles (MTD) para la Industria Química inorgánica de gran volumen de producción (Amoniaco, ácidos y fertilizantes) se detallan las mejores técnicas disponibles para la producción de fertilizantes NPK y para la producción de superfosfato simple (SSP) y superfosfato triple (TSP).

El documento mencionado considera MTD asociadas a los niveles de emisión de contaminantes atmosféricos para los superfosfatos, entre otras, las siguientes [16]:

- Reducir las emisiones de polvo de la trituración de la roca utilizando filtros textiles o de cerámica y obtener unos niveles de emisión de polvo de entre 2,5 y 10 mg/Nm³.
- Reducir las emisiones de fluoruros utilizando lavadores y líquidos de lavado adecuados y alcanzar niveles de emisión de entre 0,5 y 5 mg/Nm³ expresados en HF.
- Reducir las emisiones atmosféricas resultantes utilizando las siguientes técnicas:
- Ciclones y/o filtros textiles.
- Lavado por vía húmeda, por ejemplo, lavado combinado.

6.2. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE GASES RESIDUALES EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

Los gases producidos en el solubilizador, como se ha indicado anteriormente, contienen ácido fluorhídrico (HF), ácido clorhídrico (HCl) y partículas. Esta corriente de gases alcanza temperaturas de hasta 100°C y el caudal máximo es de 24.000 Nm³/h. Los límites de emisión para este foco son, según la autorización ambiental integrada de la empresa:

- Partículas ≤ 50 mg/Nm³;
- HCl ≤ 15 mg/Nm³;
- HF ≤ 5 mg/Nm³.

A continuación, se presentarán las mejores técnicas disponibles para el tratamiento de dichas emisiones.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

El orden adecuado de aplicación de las técnicas de tratamiento de gases con las características expuestas es el siguiente:

- 1ª Etapa: eliminación de las partículas de polvo.
- 2ª Etapa: eliminación de los contaminantes gaseosos.
- 3ª Etapa: en función del rendimiento de eliminación obtenido en la 2ª etapa, será necesario una nueva etapa de eliminación de contaminantes.

En la Figura 10 se presentan esquematizadas las técnicas de tratamiento de gases residuales en función del tipo de contaminante. Se distingue entre técnicas de recuperación y técnicas de eliminación. Estas últimas son desestimadas para el objeto de este TFM, así como las técnicas de recuperación de energía, debido a que las sustancias separadas en los tratamientos pueden ser reutilizadas en el proceso productivo.

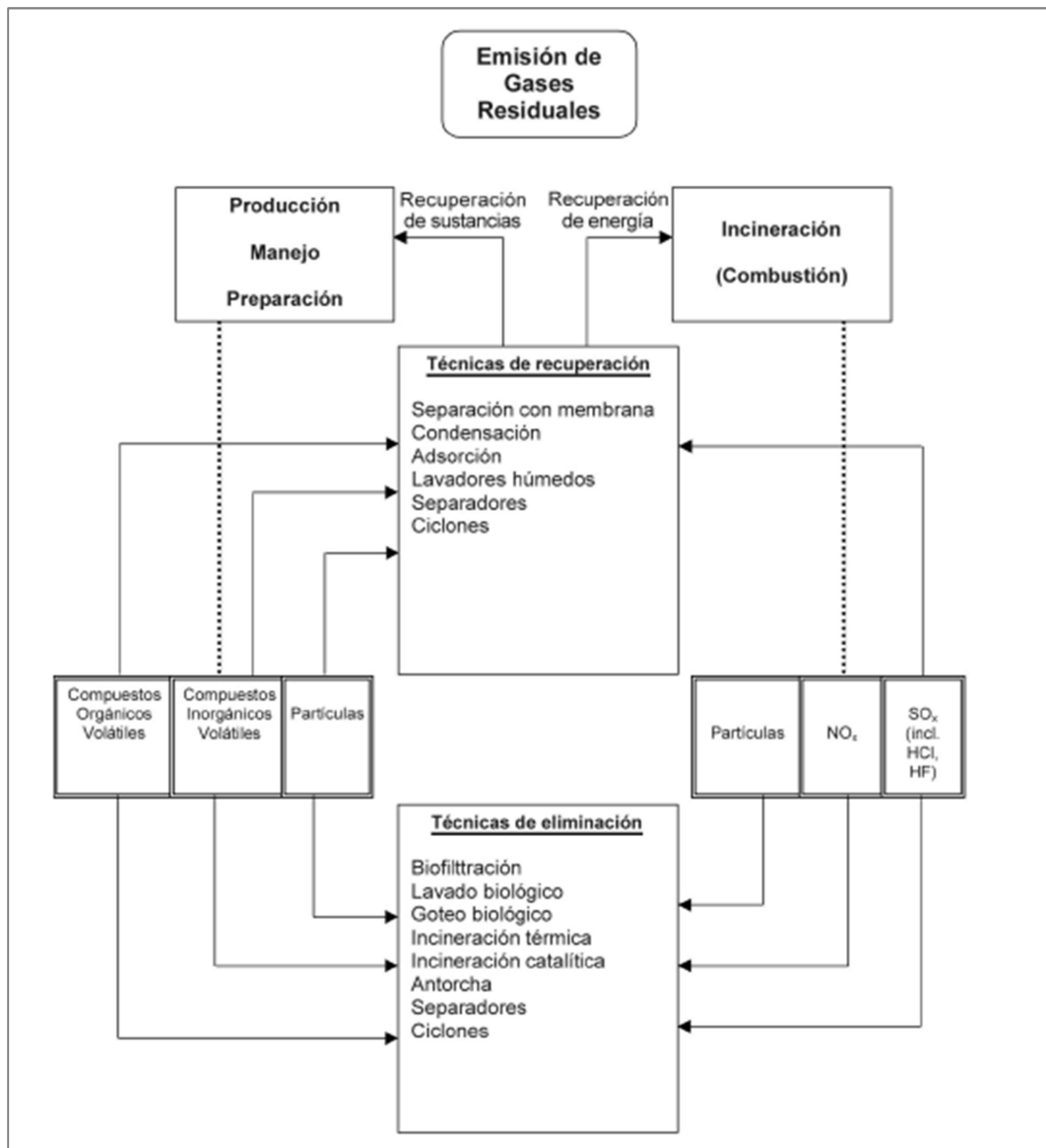


Figura 13: Técnicas de tratamiento de gases residuales en relación al tipo de contaminante.

[17]

6.2.1. Técnicas de tratamiento de partículas

Entre las técnicas de tratamientos de partículas asociadas con MTD se encuentran:

- Separador (separador por inercia o cámara de sedimentación): disgrega el contenido en polvo, aerosoles y/o agua de la corriente gaseosa gracias a la acción de la gravedad o inercia. Las partículas más grandes contenidas en la corriente caen al disminuir la velocidad del gas. Se pueden añadir en su interior elementos que reducen la velocidad del gas aumentando así su eficacia de separación.
- Ciclón: están compuestos generalmente por una cámara cónica donde se aplican fuerzas centrífugas al gas para eliminar las partículas contenidas en la corriente. Debido a la fuerza centrífuga del gas, las partículas son enviadas a las paredes del ciclón; las que alcanzan la pared son recogidas en una tolva inferior.
- Precipitador electrostático: en estos dispositivos se emplean fuerzas eléctricas para desplazar las partículas contenidas en la corriente gaseosa a placas colectoras. La corriente de gas se hace pasar por una corona donde las partículas contenidas en ella reciben una carga eléctrica. Una vez las partículas están ionizadas se conducen a través de placas colectoras cargadas, donde quedan adheridas. Los precipitadores electrostáticos pueden ser secos o húmedos en función del método de limpieza. En los secos la limpieza de las placas se realiza mediante un mecanismo acústico o de sacudida. En los precipitadores húmedos las placas colectoras son rociadas con agua.
- Lavador húmedo: la captación de partículas en estos equipos se basa en el contacto de la corriente gaseosa con gotas de líquido. A menor tamaño de las gotas de líquido, mayor eficacia de captación. Como técnicas de lavadores húmedos de partículas se recomiendan: lavador de relleno fibroso, lavadores de columna de platos, torres de rociado, lavadores de impacto y arrastre y los lavadores Venturi.
- Filtro de mangas: en estos equipos el gas residual atraviesa un tejido o fieltro (manga) donde las partículas quedan recogidas. Un filtro está compuesto por una cantidad determinada de mangas. El tipo de tejido de la manga se ha de elegir en función de las condiciones operativas del equipo. La frecuencia de limpieza de las mangas, así como la concentración de entrada del gas residual, determinan de forma directa la eficacia de recolección de partículas.
- Filtro de polvo de dos etapas: en este caso se utiliza tela metálica como filtro. Este equipo consta de dos etapas: en la primera etapa se aglomera una torta de filtro y en la segunda etapa se produce la filtración de las partículas. Las dos etapas se intercambian entre sí para poder realizar el ciclo de limpieza.
- Filtro absoluto (HEPA): el material utilizado como filtro es papel o plancha de fibras de vidrio con alta densidad de empaquetado. El medio de filtración se dispone plisado con el fin de aumentar la superficie de recolección. La torta de polvo generada en el medio filtrante aumenta el rendimiento de captación. El uso de este equipo requiere una prefiltración mediante otra de las técnicas que elimine las partículas de diámetro mayor a 2,5µm.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

- Filtro de neblina (eliminadores de niebla o desnebulizadores): se trata de filtros de almohadillas de malla, de material metálico o tejido sintético. Las partículas de polvo se acumulan en el filtro mediante impacto mecánico, variando la eficacia en función de la velocidad del gas. La malla se diseña para captar tamaños de partícula determinados.

En la Tabla 2 se presentan las restricciones de aplicación y el nivel de eficacia alcanzable de las técnicas expuestas anteriormente. Los datos presentados han sido extraídos del documento BREF: Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea, Sistemas de gestión y tratamiento de aguas y gases residuales en el sector químico [17].

Tabla 2: Técnicas de tratamiento de partículas: restricciones e índice de eficacia.

TÉCNICAS	CAUDAL DE GAS RESIDUAL (Nm ³ /h)	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS (mg/Nm ³)	TAMAÑO DE PARTÍCULAS	ÍNDICE DE EFICACIA ALCANZABLE (%)		
SEPARADOR	100-100.000	< 540 (condicionado por el material del separador)	Sin restricción	> PM10, mayor rendimiento con > PM50	10-90 (en función del tamaño de partícula)		
CICLÓN	1-100.000	> 1200 (condicionado por el material del ciclón)	1.000-16.000.000	PM € [2,5-200]	Convencional	Alta eficacia	Alta productividad
					PM: 70-90	PM: 80-99	PM: 80-99
					PM10: 30-90	PM10: 60-95	PM10: 10-40
					PM5: -	PM5: 90	PM5: -
					PM2,5: 0-40	PM2,5: 20-70	PM2,5: 0-10
PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO	1.800-1.800.000	≤ 700 (seco) < 90 (húmedo)	1000-110.000	> PM1 (seco)	Seco		Húmedo
					PM: 99-99,2		PM: 99-99,2
					PM10: 97,1-99,4		PM10: 97,1-99,2
					PM2,5: 96-99,2		PM2,5: 97,4-99,2
LAVADOR DE RELLENO FIBROSO	1.800-170.000	<60	200-11.000	Finas y/o solubles	70-99		
COLUMNA DE PLATOS	1.700-130.000	4-370	Sin límites	≤ PM10	50-99		
TORRES DE ROCIADO	2.500-170.000	4-370	Sin límites	≤ PM10	70-99		
LAVADOR DE IMPACTO Y ARRASTRE	1.700-90.000	≤150	≤ 23.000	PM € [2-10]	80-99		
LAVADOR VENTURI	720-100.000	4-370	1.000-115.000	≤ PM10	70-99		

Tabla 2 (continuación): Técnicas de tratamiento de partículas: restricciones e índice de eficacia.

TÉCNICAS	CAUDAL DE GAS RESIDUAL (Nm ³ /h)	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS (mg/Nm ³)	TAMAÑO DE PARTÍCULAS	ÍNDICE DE EFICACIA ALCANZABLE (%)
FILTRO DE MANGAS	300-1.800.000	Ha de ser superior al punto de rocío de cualquier condensable que se encuentre en la corriente residual.	1.000-23.000	< PM2,5	99-99,9
FILTRO DE POLVO DE DOS ETAPAS	≤ 150.000	≤ 500	Sin restricción	Sin restricción	99
FILTRO HEPA	100-3.600 (por módulo)	< 200	1.000-30.000	< PM0,3	PM0,01: > 99,99
					PM0,1: > 99,9999
FILTRO DE NEBLINA	≤ 150.000	< 170	< 1	Específico	99

6.2.2. Técnicas de recuperación de compuestos inorgánicos: lavadores húmedos para la eliminación de gases

Las técnicas de recuperación de contaminantes se basan en la absorción, es decir, fuerzan el contacto de un gas soluble y un disolvente con el fin de que haya una transferencia de materia desde el gas hacia el disolvente. El lavado físico permite la recuperación de los compuestos químicos absorbidos, mientras que un lavado químico retira y elimina los compuestos químicos de la corriente gaseosa.

La instalación de lavadores suele ir precedida de pre-enfriadores que reducen la temperatura de los gases favoreciendo así el proceso de absorción entre dichos gases y el líquido de lavado.

Se presentan diferentes tipos de equipos de absorción para el tratamiento de gases residuales, como:

- Lavador de relleno fibroso: estos lavadores contienen en su interior planchas dispuestas de manera vertical u horizontal que se irrigan con el líquido de lavado. Se emplean para la absorción de elementos ácidos (cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno, ácido crómico y ácido sulfúrico) y compuestos orgánicos e inorgánicos. Este tipo de lavador puede ocasionar problemas debido a la obstrucción de las boquillas, al taponamiento de los lechos de fibras y al insuficiente humedecimiento de las planchas.
- Lavador de lecho móvil: están compuestos de rejillas sobre las que se dispone el material de relleno; en este caso se trata de esferas de plástico de baja densidad y

superficie lisa, que gracias a estas características están en constante movimiento sobre las rejillas evitando obstrucciones en el lavador. Son de aplicación para eliminar dióxido de azufre, fluoruro de hidrógeno y olores. También se usan para el tratamiento de corrientes con partículas de polvo.

- Lavador de lecho relleno: este tipo de absorbedor consta de un lecho de materiales de relleno de diferentes formatos. Se utilizan para absorber gran cantidad de sustancias (variando en cada caso el reactivo utilizado en el líquido de lavado) como amoníaco, ácido crómico, fluoruros, sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, cloruros y compuestos orgánicos volátiles (COV). Su uso está limitado a corrientes cuyo contenido en partículas sea inferior a $0,5 \text{ g/Nm}^3$.
- Lavador de columna de platos: se trata de una columna vertical que contiene en su interior varios platos perforados. Este tipo de lavadores ofrece una elevada eficacia y facilidad para su mantenimiento. Se emplean en la absorción de ácidos, dióxido de azufre y olores.
- Torre de rociado: consta de boquillas de rociado del líquido de lavado en su parte superior y una entrada del gas residual en el fondo de la misma. El contacto entre el gas y el líquido de lavado normalmente se produce a contracorriente, aunque también puede darse a cocorriente. Su aplicación común es la eliminación de gases ácidos y olores.
- Lavador Venturi: el funcionamiento de este tipo de lavador se basa en la aceleración del gas a través de una garganta Venturi. En dicha garganta se introduce el líquido lavador que es atomizado por la corriente de gas. La eficacia de eliminación aumenta con la velocidad del gas y la caída de presión.

La Tabla 3 presenta los datos límite de aplicación de los diferentes tipos de lavador expuestos. Los límites y restricciones que se muestran en la Tabla 3 se han obtenido del documento BREF: Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea, Sistemas de gestión y tratamiento de aguas y gases residuales en el sector químico [17].

Tabla 3: Límites y restricciones de aplicación de los lavadores húmedos.

TIPO DE LAVADOR	CAUDAL DE GAS RESIDUAL (Nm ³ /h)	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE (mg/Nm ³)	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS (mg/Nm ³)	CONTAMINANTES	
LAVADOR DE RELLENO FIBROSO	1.800-170.000	<60	200-11.000	200-11.000 (carga total junto con contaminantes)	HF	H ₂ CrO ₄
					HCl	Compuestos orgánicos
					H ₂ SO ₄	Compuestos inorgánicos
LAVADOR DE LECHO MÓVIL	50-500.000	5-80	Sin restricción	Sin restricción	SO ₂	
					HF	
					Olores	
LAVADOR DE LECHO RELLENO	900-130.000	4-38	Sin restricción	< 450	SO ₂	NH ₃
					H ₂ CrO ₄	Cl ⁻
					H ₂ S	F ⁻
					COV	
LAVADOR DE COLUMNA DE PLATOS	1.700-130.000	4-38 (gases) 4-370 (PM)	Sin límites	Sin límites	Ácidos	
					SO ₂	
					Olores	
TORRES DE ROCIADO	2.500-170.000	4-38 (gases) 4-370 (PM)	100-10.000	Sin límites	Ácidos	
					Olores	
LAVADORES VENTURI	720-100.000	4-370	Sin límites	< 115.000	HCl	NH ₃
					HF	

CAPÍTULO 7. CARACTERIZACIÓN DE LOS GASES A TRATAR

7.1. IDENTIFICACIÓN DE LOS GASES A TRATAR

Tal y como se ha introducido anteriormente en el Capítulo 3, en el área productiva de solubilización se va a instalar una nueva línea de fabricación. Esta nueva línea constará de características similares a la anterior, es decir, los equipos poseerán especificaciones técnicas semejantes (reactor y tolvas dosificadoras) y los productos a fabricar continuarán siendo los mismos.

Los gases residuales generados en el reactor de la línea 1 (R1) son tratados en un lavador de gases; este foco de emisión atmosférica corresponde al Foco 3, captación de solubilización, en la AAI de la empresa. La posibilidad de utilizar este lavador de gases para tratar conjuntamente los gases del reactor 1 y del reactor 2 ha sido desestimada tras analizar las mediciones puntuales efectuadas en el Foco 3 en los cuatro trimestres del año 2017. Los resultados obtenidos en estas mediciones se muestran en la Tabla 4. Estos datos se encuentran dentro de los Informes de resultados del control de emisiones a la atmósfera correspondiente a la empresa Fertinagro Biotech, S.L. en sus instalaciones en Sarrión (Teruel).

Tabla 4. Mediciones puntuales de la concentración de emisión en el Foco 3 durante los cuatro trimestres del año 2017.

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN DE EMISIÓN (mg/Nm ³)	LÍMITE DE EMISIÓN (mg/Nm ³)
Partículas	32,3	50
	45,3	
	15,1	
	25,1	
HCl	14,9	15
	10,52	
	13,04	
	12,09	
HF	3,6	5
	3,51	
	2,83	
	2,24	

Al analizar los datos de las mediciones realizadas a lo largo del año 2017 se observa que para los tres contaminantes contenidos en el gas residual se han producido emisiones cuya concentración estaba próxima al límite de emisión marcado por la AAI. En varias de estas mediciones, tanto para las partículas como para los ácidos, la concentración era superior a la mitad del límite de emisión. Por ello, se deduce que el sistema actual de tratamiento de gases no posee capacidad suficiente para tratar el caudal de gases residuales que se generará con la puesta en marcha de ambas líneas. Es decir, si el lavador de gases actual se empleara para el tratamiento de los gases de ambos reactores no se alcanzaría la eficiencia necesaria y la concentración de emisión en el Foco 3 superaría los límites de emisión legales para los tres contaminantes.

Debido a los motivos expuestos, se requiere realizar el diseño de un sistema de tratamiento de gases con capacidad adecuada para la eliminación de los contaminantes contenidos en la corriente de gases residuales generada por los dos reactores.

7.2. CARACTERIZACIÓN DEL GAS A TRATAR

Con el objetivo de realizar el diseño más apropiado para el sistema de tratamiento de gases se requiere la caracterización del gas a tratar. A partir de las propiedades de la corriente gaseosa se buscará el equipo o equipos actuales más adecuados para su tratamiento. Es necesario partir de las propiedades de la corriente debido a que algunos equipos presentan restricciones de uso, así como por el rendimiento mínimo necesario que han de proporcionar para mantener las emisiones de contaminantes dentro de los límites legales.

La corriente de gas a tratar se genera dentro de los reactores con la mezcla de las materias primas sólidas y las líquidas, ya que al añadir las materias primas líquidas se generan reacciones químicas. La corriente contiene partículas, debido a los materiales sólidos, y ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico que se emiten al producirse las reacciones químicas entre los líquidos añadidos en el reactor. La temperatura máxima que puede alcanzar dicha corriente es de 100°C; en condiciones de trabajo normales la temperatura es de 70°C.

La caracterización de la corriente de gas se ha realizado a partir de la Línea 1 de solubilización. El caudal máximo de esta corriente gaseosa en condiciones normales es de 12000 Nm³/h, por lo que el caudal para la captación de los dos reactores ha de ser el doble del actual, 24000 Nm³/h.

Para la determinación de las concentraciones de los contaminantes en la corriente de gas a tratar se han realizado mediciones en la salida de gases del reactor. Las mediciones se han realizado en tres días, en los cuales se estaban fabricando productos diferentes. Para cada tipo de contaminante se han efectuado tres mediciones diarias puntuales con una duración de una hora cada una de ellas; a partir de estas medidas se ha calculado una media que se tomará como la concentración final de los contaminantes en la corriente. Los datos obtenidos en estas mediciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Mediciones de la concentración del gas residual emitido en el Reactor 1.

CONTAMINANTE	DÍA	MEDIDA	CONCENTRACIÓN (mg/Nm ³)	MEDIA (mg/Nm ³)
Partículas	1	1.1	9750	6000
		1.2	3900	
		1.3	2950	
	2	2.1	4800	
		2.2	5200	
		2.3	5150	
	3	3.1	7600	
		3.2	6550	
		3.3	8100	
HCl	1	1.4	650	549,44
		1.5	340	
		1.6	750	
	2	2.4	490	
		2.5	400	
		2.6	130	
	3	3.4	830	
		3.5	725	
		3.6	630	
HF	1	1.7	520	2698,89
		1.8	230	
		1.9	180	
	2	2.7	6680	
		2.8	5750	
		2.9	4320	
	3	3.7	2100	
		3.8	1860	
		3.9	2650	

Como en la Línea 2 se van a fabricar los mismos productos que en la Línea 1, se considerará que la concentración de los contaminantes en el gas residual del Reactor 2 será similar a la expuesta en la Tabla 5. Con el fin de facilitar los cálculos, las concentraciones se redondearán al alza, es decir, la concentración de partículas en el gas residual se considerará 6000 mg/Nm³, la concentración de HCl, 550 mg/Nm³ y para el HF 2700 mg/Nm³.

En la Tabla 6 se presentan las características de la corriente gaseosa a tratar y en la Tabla 7 se indica su composición y los límites de emisión de los contaminantes que contiene, de acuerdo con la autorización ambiental integrada. Los límites de emisión expuestos corresponden al Foco 3 de la AAI, presentados previamente en la Tabla 1.

Tabla 6. Características de la corriente residual de gas a tratar.

CORRIENTE GAS RESIDUAL	
Q_{\max}	24000 Nm ³ /h
Q_{\max} (70 °C y 1 atm)	30153 m ³ /h
Temperatura operación	70 °C
Temperatura máxima	100 °C

Para calcular el caudal másico de la corriente de gas residual total se ha multiplicado la concentración de los contaminantes por el caudal máximo de la corriente, 24000 Nm³/h.

Tabla 7. Composición de la corriente de gas residual a tratar y sus límites de emisión.

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN	CAUDAL	LÍMITES DE EMISIÓN
Partículas	6000 mg/Nm ³	144 Kg/h	50 mg/Nm ³
HCl	550 mg/Nm ³	13,2 Kg/h	15 mg/Nm ³
HF	2700 mg/Nm ³	64,8 Kg/h	5 mg/Nm ³

Conociendo la concentración de los contaminantes y los límites de emisión de los mismos se puede calcular el rendimiento mínimo de eliminación para cada uno de los contaminantes que ha de proporcionar el sistema de depuración a diseñar.

Rendimiento de eliminación mínimo para partículas:

$$\eta_{min,partículas} = \frac{6000 - 50}{6000} \cdot 100 = 99,16\%$$

Rendimiento de eliminación mínimo para ácido clorhídrico:

$$\eta_{min,HCl} = \frac{550 - 15}{550} \cdot 100 = 97,27\%$$

Rendimiento de eliminación mínimo para ácido fluorhídrico:

$$\eta_{min,HF} = \frac{2700 - 5}{2700} \cdot 100 = 99,81\%$$

El rendimiento de los equipos de eliminación de partículas varía en función del tamaño de éstas. Debido a esta condición, es necesario obtener la distribución del tamaño de partícula de la corriente de gas residual a depurar.

La distribución del tamaño de partícula se ha determinado mediante un análisis granulométrico. Para ello, se ha tomado una muestra de las partículas decantadas durante una hora en el sistema de depuración de la Línea 1. Posteriormente, se ha realizado un cribado de

esta muestra a través de tamices de los siguientes números de malla, en μm : 300, 250, 200, 150, 100, 75, 50, 25 y 7,5.

En la Tabla 8 se detalla la distribución del tamaño de partícula de la corriente gaseosa presentada en porcentaje en peso para cada una de las fracciones granulométricas obtenidas. El porcentaje en peso de las partículas cuyo tamaño medio es inferior a 7,5 μm es de 3,62% del peso total de la muestra analizada. Entre 7,5 y 25 μm hay un 11,94% en peso de partículas. Ídem para el resto de tamaños de partícula hasta 300 μm . La cantidad de partículas cuyo tamaño es superior a 300 μm es tan solo del 0,01%.

Tabla 8. Distribución del tamaño de partícula de la corriente de gas residual a tratar.

Tamaño medio d_p (μm)	Porcentaje en peso w_i (%)
7,5	3,62
25	11,94
50	15,60
75	26,51
100	13,49
150	10,18
200	10,35
250	3,77
300	4,53
> 300	0,01

Observando los resultados plasmados en la Tabla 8, se puede deducir que la mayoría de las partículas se encuentran en el rango comprendido entre 25 y 200 μm .

Pese a que el porcentaje de partículas cuyo tamaño medio es inferior a 25 μm sea reducido, se debe lograr un rendimiento de eliminación de las mismas elevado. Esto se debe a que los límites de inmisión, los cuales no se han presentado por no ser de aplicación para este proyecto, se ven directamente afectados por la emisión de partículas de tamaño inferior a 2,5 μm .

CAPÍTULO 8. DISEÑO DEL LAVADOR DE GASES

8.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

El sistema de lavado de gases diseñado consta de una primera etapa en la que se eliminan las partículas de mayor diámetro a través de un ciclón y una segunda etapa con un lavador Venturi donde se eliminarán conjuntamente las partículas de diámetro inferior y los gases. Como medida adicional se realiza el diseño de una torre de aspersion por si una vez puesta en marcha la instalación no se alcanzara el rendimiento de eliminación necesario con los equipos diseñados.

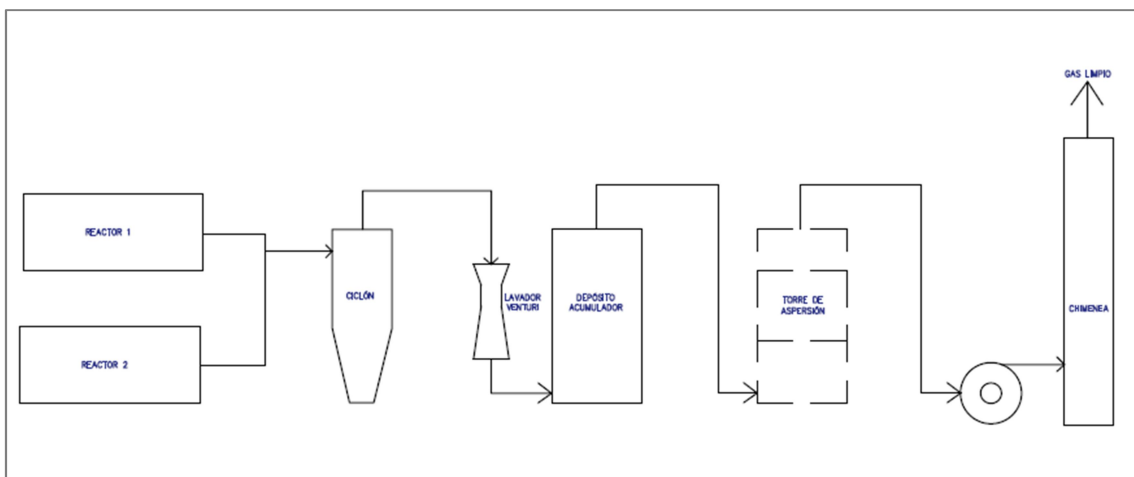


Figura 14: Diagrama de flujo del sistema propuesto para el tratamiento de gases residuales.

8.1.1. Elección de la primera etapa

En la primera etapa se pretende eliminar las partículas de mayor diámetro, entre 75 y 300 μm .

A partir de las características de la corriente gaseosa y las restricciones de las técnicas de tratamiento de partículas presentadas en la Tabla 2 se ha realizado la elección del equipo adecuado para esta primera etapa.

En cuanto al caudal de gas residual a tratar cualquiera de las técnicas presentadas sería adecuada, pues 24000 Nm^3/h se encuentra dentro del rango de operación de todas estas técnicas.

La temperatura de la corriente gaseosa a tratar, 70 °C (máximo 100 °C), descarta la utilización del lavador de relleno fibroso como técnica de tratamiento de partículas, pues la temperatura máxima a la que puede trabajar este equipo es 60 °C.

La concentración de partículas de la corriente gaseosa a tratar es 6000 mg/Nm³. Como se observa en la Tabla 2, algunas de las técnicas presentan restricciones en cuanto a la concentración máxima de partículas del gas que pueden tratar. Debido a esta restricción se desestima el diseño tanto de un filtro HEPA como de un filtro de neblina, pues la concentración máxima que admiten se encuentra por debajo de la de la corriente gaseosa a depurar.

Tal y como se ha indicado, en esta etapa se pretenden eliminar las partículas de tamaño comprendido entre 75 y 300 µm. Debido a que el tamaño de partícula a captar será superior a 75 µm, se desestiman aquellas técnicas apropiadas para captar partículas de tamaños inferiores: columna de platos, torres de rociado, lavador de impacto y arrastre, lavador Venturi y filtro de mangas.

Finalmente, tras descartar las técnicas de tratamiento de partículas no adecuadas para tratar una corriente con las características expuestas, resta elegir entre un separador, un ciclón y un filtro de polvo de dos etapas.

La primera técnica en desestimarse es el separador (cámara de sedimentación) debido a que requiere un elevado volumen de cámara para lograr un rendimiento de eliminación aceptable, superior al 50%.

Los rendimientos de eliminación para el filtro de polvo de dos etapas y el ciclón son similares. Por ello, para realizar la elección entre ambos equipos se han revisado los costes operativos anuales. Los costes de operación anuales para el filtro de polvo de dos etapas alcanzan los 2350€ por cada 1000 Nm³/h de gas tratado; en el ciclón estos costes son de 200€ por cada 1000 Nm³/h. Tras comparar estos costes, se ha optado por el diseño de un ciclón ya que los costes operativos para este equipo son aproximadamente diez veces menores que para el filtro de polvo de dos etapas.

Los costes de operación anuales estimados han sido extraídos del documento BREF: Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea, Sistemas de gestión y tratamiento de aguas y gases residuales en el sector químico [17].

8.1.2. Elección de la segunda etapa

En la segunda etapa se requiere la eliminación de las partículas de menor tamaño que no han podido ser captadas en el ciclón y la depuración de los contaminantes ácidos (ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico).

Para seleccionar el lavador húmedo más adecuado se van a comparar los límites y restricciones de cada una de estas técnicas, presentados en la Tabla 3, con las características de la corriente de gas residual a tratar.

Al igual que ocurre con las técnicas de recuperación de partículas, el caudal de la corriente de gas se encuentra dentro del rango de funcionamiento de todas las técnicas de lavado de gases.

Debido a que la temperatura del gas residual en condiciones de operación es 70 °C, y en ocasiones se puede alcanzar la temperatura máxima de 100 °C, la mayoría de los tipos de lavadores húmedos presentados en la Tabla 3 han de ser descartados para el diseño. La temperatura de la corriente se encuentra fuera del rango de temperatura en el que pueden trabajar los siguientes equipos: lavador de relleno fibroso, lavador de lecho relleno, lavador de columna de platos y torres de rociado.

El lavador de lecho móvil puede trabajar con temperaturas de hasta 80 °C; este límite estaría muy próximo a la temperatura del gas en el caso de que se alcanzara la temperatura máxima de operación de 100 °C. Este equipo ha de ser desestimado por la temperatura y sobretodo porque dentro de los contaminantes para los cuales es apropiado no se encuentra el ácido clorhídrico ni las partículas.

El lavador húmedo más apropiado para esta etapa es el lavador Venturi. Todas las características de la corriente de gas residual se encuentran dentro de los límites de aplicación de este lavador, las cuales son: caudal, temperatura, concentración de contaminantes, concentración de partículas y los tipos de contaminantes, pues es apropiado para HCl y HF.

Además, este lavador puede alcanzar una alta eficiencia, 70-99%, en la captación de partículas cuyo diámetro se encuentra dentro del rango 2,5 y 10 μm .

8.1.3. Elección de la tercera etapa

Por último, como se ha comentado anteriormente, se va a realizar el diseño de una tercera etapa por si tras la puesta en marcha de la instalación no se alcanzaran los rendimientos de captación esperados, tanto para partículas como para ácidos.

En esta etapa se busca la captación de las partículas de tamaño inferior a 25 μm , debido a que son las más complicadas de captar y algunas podrían atravesar los dos equipos anteriores, así como la depuración de los ácidos que todavía permanezcan en la corriente gaseosa.

Para esta etapa se va a realizar una comparación entre los lavadores húmedos que son adecuados para la captación de los ácidos clorhídrico y fluorhídrico y para el tratamiento de las partículas cuyo tamaño se encuentra entre 2,5 y 10 μm . Los equipos que cumplen estos requisitos son el lavador de relleno fibroso, el lavador de columna de platos, las torres de rociado y el lavador Venturi.

Tras analizar el índice de eficacia alcanzable para cada uno de los equipos en la Tabla 2, se desestima el diseño de una columna de platos debido a que el índice de eficacia alcanzable es inferior al logrado por los otros tres equipos.

Entre los tres lavadores húmedos adecuados para esta etapa y cuyo índice de eficacia alcanzable es similar se ha elegido una torre de rociado. La razón de la elección de este equipo ha sido la sencillez del diseño de la misma, lo que conlleva a unos bajos costes operativos y de mantenimiento.

8.2. DISEÑO DEL CICLÓN

En este caso, de los tres tipos de ciclones existentes en función de la eficacia de los mismos (ver Tabla 2), se ha optado por un ciclón convencional ya que tras el ciclón se instalará un lavador Venturi que también realizará extracción de partículas, con alta eficacia de remoción de partículas de pequeño tamaño.

8.2.1. Dimensiones geométricas

En la Figura 15 se representa la geometría de un ciclón.

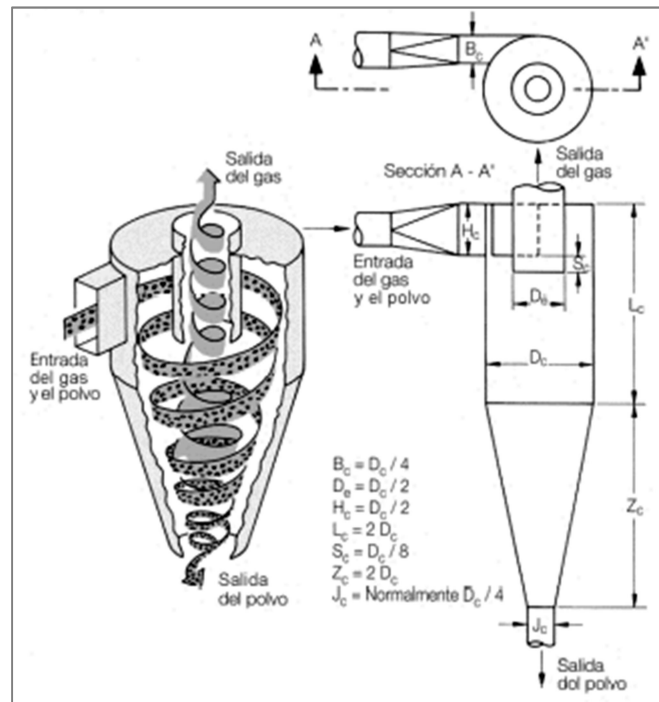


Figura 15: Esquema de un ciclón. [18]

Las proporciones dimensionales normales de un ciclón son las siguientes:

- Diámetro del ciclón: D_c
- Ancho de la sección de entrada: $B_c = \frac{D_c}{4}$
- Altura de la sección de entrada: $H_c = \frac{D_c}{2}$
- Sección de entrada: $H_c \cdot B_c$
- Diámetro del cilindro de salida: $D_e = \frac{D_c}{2}$
- Altura de salida: $S_c = H_c + \frac{D_c}{8}$
- Altura de la parte cilíndrica: $L_c = 2 \cdot D_c$
- Altura de la parte cónica: $Z_c = 2 \cdot D_c$

- Diámetro de la sección de salida del polvo: $J_c = \frac{D_c}{4}$

8.2.2. Revoluciones del gas dentro del ciclón

Una de las principales variables que afecta a la eficiencia colectora de un ciclón es el número de revoluciones del gas dentro del ciclón, es decir, el número de vueltas que da una partícula dentro de un ciclón. El gas se desplaza a través de la sección cilíndrica y cónica, y en la parte inferior del cono el gas cambia su dirección hacia la parte superior para abandonar el ciclón por el cilindro de salida.

El número de revoluciones, N, puede calcularse a través de la Ecuación 1:

$$N = \frac{t_r \cdot v_c}{\pi \cdot D_c} \quad (1)$$

donde t_r es el tiempo de residencia del gas en el colector y v_c es la velocidad de entrada del gas en el colector.

$$v_c = \frac{Q_G}{A_{entrada}} = \frac{Q_G}{H_c \cdot B_c} \quad (2)$$

El tiempo de residencia del gas en el colector se puede estimar a través del volumen total del colector, V, y el caudal de gas, Q_G :

$$t_r = \frac{V}{Q_G} = \frac{2,135 \cdot D_c^3}{Q_G} \quad (3)$$

8.2.3. Tamaño de partícula con eficiencia de recolección del 50%

La eficacia de recolección de un ciclón viene determinada por el diámetro de partícula d_{50} , diámetro de partícula para la que el ciclón tiene una eficacia del 50%.

Este tamaño de partícula se calcula con la Ecuación 4.

$$d_{50} = \sqrt[2]{\frac{9 \cdot B_c \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot v_c \cdot (\rho_p - \rho)}} \quad (4)$$

donde:

- B_c : ancho de la sección de entrada (m)
- N : número de vueltas que da la partícula en el interior del ciclón
- v_c : velocidad de entrada del gas en el colector (m/s)
- μ : viscosidad absoluta del gas que arrastra la partícula (kg/(m·s))
- ρ : densidad del gas que arrastra la partícula (kg/m³)
- ρ_p : densidad de la partícula (kg/m³)

8.2.4. Eficacia de recolección

Para determinar la eficacia de recolección en función del tamaño de partícula existen gráficas en las que se representa la eficacia de recolección en función de la relación d_p/d_{50} . Una de estas gráficas fue realizada por Lapple que empleó datos experimentales de eficiencia de recolección para ciclones de tamaño estándar y graficó una curva generalizada de eficiencia de remoción, en función del diámetro adimensional d_p/d_{50} . La curva se puede representar mediante la ecuación (Theodore y DePaola, 1980) [19]:

$$\eta(d_p) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p}\right)^2} \cdot 100 \quad (5)$$

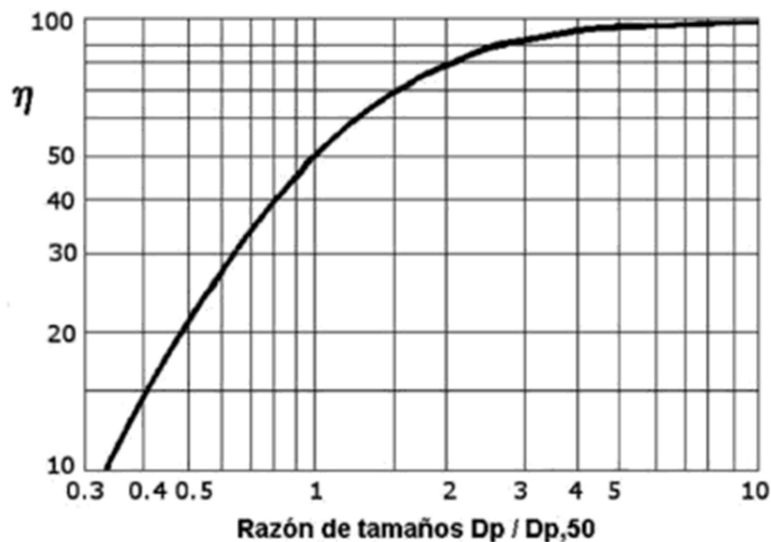


Figura 16: Gráfico generalizado de eficiencia del ciclón (Lapple, 1951). [19]

Así mismo las eficacias de recolección de partículas en función del tipo de ciclón y del tamaño de partícula presentadas anteriormente en la Tabla 2 se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9: Eficacia de recolección en función del tipo de ciclón y del tamaño de partícula. [17]

Tamaño de partícula (μm)	Índice de eficacia (%)		
	Convencional	Alta eficacia	Alta productividad
PM	70-90	80-99	80-99
PM₁₀	30-90	60-95	10-40
PM_{2,5}	0-40	20-70	0-10

El rendimiento global del ciclón puede calcularse con la Ecuación 6, mediante las eficiencias unitarias en función del tamaño de partícula y el porcentaje en peso de las mismas, o mediante la ecuación 7, teniendo en cuenta las concentraciones del contaminante en el gas de entrada (X) y en la salida (Y).

$$\eta = \sum \frac{\eta_i(\%)}{100} \cdot w_i(\%) \quad (6)$$

donde:

- η_i : eficiencia de recolección en función del tamaño de partícula
- w_i : porcentaje en peso de un determinado tamaño de partícula

$$\eta = \frac{X - Y}{X} \cdot 100 \quad (7)$$

8.2.5. Pérdida de carga

La pérdida de carga dentro del ciclón se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho(\text{kg}/\text{m}^3) \cdot v_c(\text{m}/\text{s})^2}{2} \quad (\text{N}/\text{m}^2) \quad (8)$$

donde ξ es un coeficiente adimensional que depende de la geometría del ciclón. Normalmente es suministrado por el fabricante, pero si se carece del dato puede suponerse igual a 8.

8.2.6. Cálculos

Previamente a comenzar con los cálculos se ha de convertir el caudal de gas en condiciones normales a condiciones de trabajo, es decir, 70°C y 1 atm. Para realizar esta conversión se utiliza la ecuación de los gases perfectos.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (9)$$

donde:

- P: presión
- V: volumen, se realizarán los cálculos con el caudal, es decir, con volumen/tiempo
- n: número de moles
- R: constante de los gases ideales, 0,082 (L·atm/(K·mol))
- T: temperatura

El caudal en condiciones normales es 24000 Nm³/h, es decir, 6,67 Nm³/s. Despejando en la Ecuación 9 los moles y sustituyendo, se obtienen los moles por segundo del gas en condiciones normales:

$$n_{gas\ CN} = \frac{P_{CN} \cdot Q_{CN}}{R \cdot T_{CN}} = \frac{1 \cdot 6,67 \cdot 10^3}{0,082 \cdot 273} = 297,97 \text{ moles/s}$$

Por lo tanto, el caudal en las condiciones de operación será:

$$Q_{70^{\circ}C} = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} = \frac{297,97 \cdot 0,082 \cdot (273 + 70)}{1} = 8380 \frac{l}{s} = 8,38 \text{ m}^3/s$$

Para simplificar los cálculos, se considerará el gas como aire puro, por lo tanto, el peso molecular (PM) del gas será 28,964 kg/kmol. Conociendo el PM del gas y las condiciones de operación se calcula la densidad del gas:

$$\rho_{gas} = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T} = \frac{1 \cdot 28,964}{0,082 \cdot (273 + 70)} = 1,029 \text{ kg/m}^3$$

La concentración de partículas a la entrada del ciclón es de 6000 mg/Nm³. A la salida del ciclón esta concentración ha de ser igual o inferior al límite legal de emisión, 50 mg/Nm³.

La densidad de las partículas se toma igual a la densidad de la roca fosfórica, 2870 Kg/m³. Para poder calcular el diámetro de partícula para el cual el ciclón tiene una eficacia del 50% es necesario conocer la viscosidad dinámica del gas a 70°C, 2,052·10⁻⁵ kg/(m·s).

Tras calcular e introducir las propiedades de la corriente gaseosa a tratar, estas se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10: Propiedades de la corriente gaseosa a tratar en las condiciones de trabajo.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Q_G	8,38	m^3/s
ρ_{gas}	1,029	kg/m^3
μ_{gas}	$2,052 \cdot 10^{-5}$	$kg/(m \cdot s)$
[partículas entrada]	6000	mg/Nm^3
Límite legal de emisión	50	mg/Nm^3
$\rho_{partículas}$	2870	kg/m^3

Tal y como se ha comentado en el apartado 6.2. el ciclón que se va a diseñar es un ciclón convencional. El diámetro estándar para ciclones convencionales es 1 m. En la Tabla 11 se presentan las dimensiones teóricas del ciclón calculadas a partir de las proporciones dimensionales normales de un ciclón.

Tabla 11: Características dimensionales teóricas del ciclón.

DIMENSIÓN	VALOR	UNIDADES
D_c	1	m
B_c	0,25	m
H_c	0,5	m
Sección de entrada	0,125	m^2
D_e	0,5	m
L_c	2	m
Z_c	2	m
J_c	0,25	m
S_c	0,625	m

A continuación, se realizan los cálculos de los parámetros de operación del ciclón.

Velocidad del gas en la entrada del ciclón, Ecuación 2:

$$v_c = \frac{8,38}{0,5 \cdot 0,25} = 67,04 \text{ m/s}$$

Volumen total del colector:

$$V = 2,135 \cdot D_c^3 = 2,135 \text{ m}^3$$

Tiempo de residencia, Ecuación 3:

$$t_r = \frac{2,135}{8,38} = 0,255 \text{ s}$$

Número de vueltas dentro del ciclón, Ecuación 1:

$$N = \frac{0,255 \cdot 67,04}{\pi \cdot 1} = 5,44 \approx 5,5$$

Diámetro de partícula, d_{50} , Ecuación 4:

$$d_{50} = \sqrt[2]{\frac{9 \cdot 0,25 \cdot 2,052 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot \pi \cdot 5,5 \cdot 67,04 \cdot (2870 - 1,028)}} = 2,64 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2,64 \text{ }\mu\text{m}$$

Eficacia de recolección

Para realizar este cálculo teórico se va a graficar la curva de eficiencia de remoción a partir de la Ecuación 5. Los rendimientos obtenidos para cada tamaño de partícula se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12: Rendimiento obtenido a partir de la Ecuación 5 en función del tamaño de partícula y d_{50} .

Tamaño medio d_p (μm)	d_p/d_{50}	$\eta(d_p)$ (%)
7,5	2,83	88,89
25	9,43	98,89
50	18,86	99,72
75	28,29	99,88
100	37,71	99,93
150	56,57	99,97
200	75,43	99,98
250	94,28	99,99
300	113,14	99,99

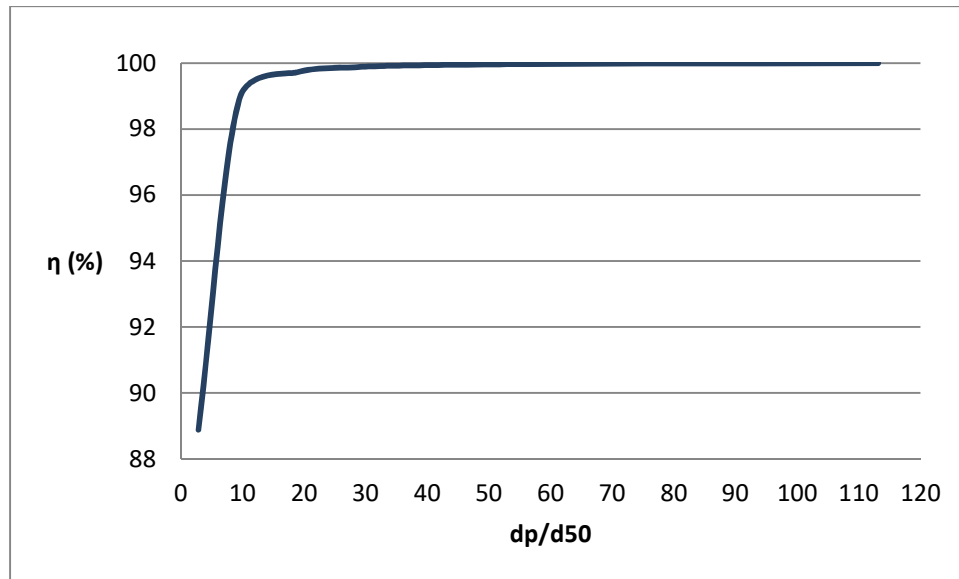


Figura 17: Gráfica de la eficiencia teórica del ciclón en función de la relación d_p/d_{50} .

A partir del porcentaje en peso en función del tamaño de partícula (w_i (%)) y de la concentración de partículas a la entrada del ciclón se obtiene la concentración de partículas en función del tamaño de partícula. Con la Ecuación 7 se calcula la concentración de partículas a la salida en función de la eficacia del ciclón. En la Tabla 13 se presentan los rendimientos de captación para cada tamaño de partícula, así como la concentración de las mismas a la salida del ciclón.

Tabla 13: Concentración de partículas a la salida del ciclón en función del tamaño de partícula.

Tamaño medio d_p (μm)	Porcentaje en peso w_i (%)	[Part. Entrada,] (mg/Nm^3)	η_i (%)	[Part. Salida,] (mg/Nm^3)
7,5	3,62	217,2	88,89	24,13
25	11,94	716,4	98,89	7,97
50	15,60	936,00	99,72	2,62
75	26,51	1.590,60	99,88	1,99
100	13,49	809,40	99,93	0,57
150	10,18	610,80	99,97	0,19
200	10,35	621,00	99,98	0,11
250	3,77	226,20	99,99	0,03
300	4,53	271,80	99,99	0,02

La cantidad de partículas en la corriente gaseosa tras atravesar el ciclón es:

$$\sum [\text{Part. Salida}_i] = 37,63 \text{ mg}/\text{Nm}^3$$

Se obtiene una concentración de partículas a la salida del equipo inferior al límite legal de emisión de partículas de 50 mg/Nm³.

En la Tabla 14 se detalla la distribución del tamaño de partícula en la corriente de salida del ciclón.

Tabla 14. Distribución del tamaño de partícula en la corriente gaseosa de salida del ciclón.

Tamaño medio d _p (μm)	[Part. Salida _i]	Porcentaje en peso w _i (%)
7,5	24,13	64,13
25	7,97	21,18
50	2,62	6,98
75	1,99	5,28
100	0,57	1,51
150	0,19	0,51
200	0,11	0,29
250	0,03	0,07
300	0,02	0,06

Se puede observar que la corriente de salida contiene aproximadamente un 85% de partículas cuyo tamaño es inferior a 25 μm. En las mediciones de emisión de partículas no se hace referencia al tamaño de las partículas emitidas. En las mediciones de inmisión sí que se tienen en cuenta las partículas de tamaño 2,5 y 10 μm. Es por ello que en la segunda etapa es necesario eliminar las partículas de menor diámetro que no ha logrado captar el ciclón, pese a que el valor de emisión se encuentra por debajo del límite legal

El rendimiento global del ciclón se calcula a partir de la Ecuación 7, obteniéndose el siguiente valor:

$$\eta = \frac{6000 - 37,63}{6000} \cdot 100$$

$$\eta = 99,37 \%$$

Caída de presión, Ecuación 8:

$$\Delta P = 8 \cdot \frac{1,029 \cdot 67^2}{2} = 18476,7 \frac{N}{m^2} = 1885,38 Pa$$

8.2.7. Fabricación del ciclón diseñado

El ciclón diseñado se fabricará a medida por una empresa especializada en la elaboración de este tipo de equipos. Debido a que las dimensiones del ciclón son exactas, no es necesario recalcular dichas dimensiones con el objetivo de facilitar la construcción del mismo.

El material utilizado para la fabricación del ciclón será acero inoxidable, AISI 316, de 8 mm de espesor. La elección de este material se debe a que el ciclón, al ser la primera etapa del sistema de tratamiento de gas, ha de soportar una gran erosión y corrosión debido a las características del gas a tratar. La erosión es provocada por las partículas contenidas en el gas residual que friccionan contra las paredes a una elevada velocidad, aproximadamente 67 m/s. La corrosión es producida por los ácidos contenidos en la corriente.

En el Plano nº 2 se puede observar el esquema del ciclón con las dimensiones del mismo.

8.3. DISEÑO DEL COLECTOR HÚMEDO DE ALTA ENERGÍA: LAVADOR VENTURI

El lavador Venturi se va a diseñar con el fin de eliminar los gases contenidos en el gas residual y las partículas que no han sido captadas en la etapa anterior.

La concentración de los contaminantes a la entrada del lavador es la siguiente:

$$[HCl] = 550 \text{ mg/Nm}^3 \rightarrow \text{Límite legal de emisión} = 15 \text{ mg/Nm}^3$$

$$[HF] = 2700 \text{ mg/Nm}^3 \rightarrow \text{Límite legal de emisión} = 5 \text{ mg/Nm}^3$$

$$[\text{Partículas}] = 37,63 \text{ mg/Nm}^3 \rightarrow \text{Límite legal de emisión} = 50 \text{ mg/Nm}^3$$

La distribución del tamaño de partícula a la entrada del lavador Venturi está reflejada en la Tabla 11, en la cual se presenta la distribución del tamaño de partícula a la salida del ciclón.

8.4.1. Sección de la garganta

La base fundamental de un lavador Venturi es un canal de flujo circular que converge a una garganta de sección menor y luego diverge a su área inicial. Es en esta garganta donde ocurre la acción de lavado del gas al introducir el líquido de lavado. En este punto el gas aumenta considerablemente su velocidad, aproximadamente 3 veces su velocidad inicial, atomizando así el agua inyectada en la garganta. Cuanto mayor sea la atomización del agua, mayor será la captación de las partículas que se produce mediante impacto por inercia.

Según diversas fuentes, la relación de áreas típica entre la entrada y la garganta es de 4:1.

$$A_1 \approx 4 \cdot A_2 \quad (10)$$

donde:

- A_1 : área de entrada al lavador Venturi
- A_2 : área de la garganta

Conociendo esta relación y el diámetro de la sección de entrada se obtiene el diámetro de la garganta, D_2 . Se trata de secciones circulares por lo que el área de dichas secciones se calcula como:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (11)$$

8.4.2. Velocidad en la garganta

A partir de la sección de la garganta se obtiene la velocidad del gas en la garganta, dato relacionado con la mayoría de las propiedades del Venturi.

$$v_G = \frac{Q_G}{A_2} \quad (12)$$

donde:

- v_G : velocidad del gas en la garganta
- Q_G : caudal de gas

8.4.3. Relación de líquido a gas

Según la Agencia para la Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA), las relaciones de flujo entre 1 y 3 l de líquido/Nm³ de gas tratado garantizan un funcionamiento óptimo del Venturi [20]. A mayor relación Q_L/Q_G , mayor eficiencia de recolección; sin embargo, con este incremento también aumentan los costes de operación. Es por ello que hay que lograr una solución de compromiso. Se debe tener en cuenta que a mayor carga de materia particulada, la relación Q_L/Q_G ha de incrementarse.

$$R = \frac{Q_L}{Q_G} \quad (13)$$

donde:

- R: relación de líquido a gas (l/Nm³)
- Q_L : caudal del líquido de lavado

8.4.4. Selección del líquido de lavado

Para esta aplicación el líquido de lavado que se va a utilizar es agua. La elección se ha tomado debido a que se van a captar partículas y los ácidos clorhídrico y fluorhídrico son ácidos fuertes, con lo cual se asume que se disocian completamente en agua.

8.4.5. Caída de presión

La caída de presión a través de una torre de limpieza por Venturi se puede estimar con la Ecuación 14:

$$\Delta P = 0,1 \cdot v_G^2 \cdot R \text{ (mmH}_2\text{O)} \quad (14)$$

8.4.6. Tamaño de gota medio

El tamaño promedio de gota, d_g , que se obtiene debido a la atomización del líquido inyectado en la garganta se calcula como:

$$d_g = \frac{4900}{v_G} + 30 \cdot R^{1,5} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (15)$$

8.4.7. Factor inercial de impacto

El factor de impacto presenta la proporción de captación de partículas que se produce mediante impacto por inercia. Si el valor de este factor es elevado, entonces un mayor número de gotas impactarán contra las partículas. Si por lo contrario es un factor bajo, una gran cantidad de partículas y gotas tenderán a seguir las líneas del flujo sin impactar entre ellas.

Cálculo del factor inercial de impacto:

$$\psi_i = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot v_G}{9 \cdot \mu \cdot d_g} \quad (16)$$

donde:

- ψ_i : factor inercial de impacto (adimensional)
- d_p : tamaño de la partícula (m)
- ρ_p : densidad de la partícula (kg/m^3)
- μ : viscosidad dinámica del gas ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)
- d_g : diámetro de gota medio (m)

8.4.8. Eficiencia de recolección de partículas

La eficacia de captación para un determinado tamaño de partícula se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta_i = 1 - e^{-k \cdot R \cdot \psi_i^{0,5}} \text{ (%)} \quad (17)$$

donde k es un coeficiente dependiente de la geometría del Venturi que oscila entre 0,75 y 1,5 m^3/l . Para el presente diseño se estimará $k=1 \text{ m}^3/\text{l}$.

Al igual que para el ciclón, la eficacia global del lavador de Venturi puede calcularse mediante las Ecuaciones 6 y 7.

8.4.9. Dimensiones geométricas

Previamente a la introducción de las ecuaciones para obtener las dimensiones teóricas de un lavador Venturi, en la Figura 18 se presenta un esquema de una garganta Venturi en la que están indicados los nombres de cada una de las dimensiones.

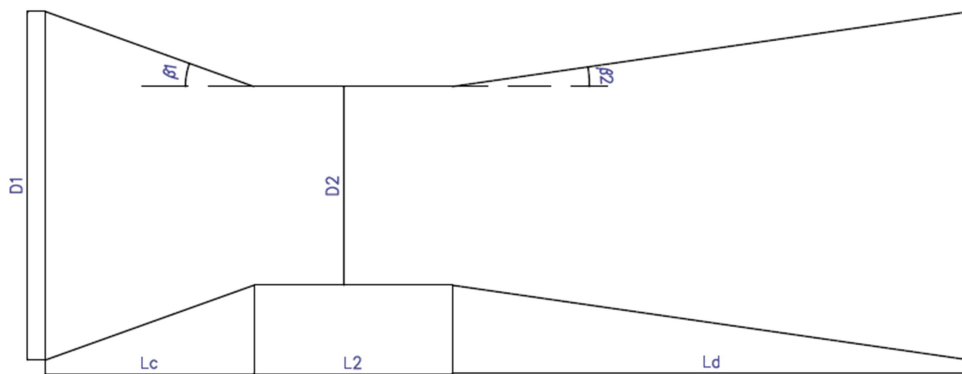


Figura 18: Esquema de las dimensiones de una garganta Venturi.

Las dimensiones son las siguientes:

- D_1 : diámetro de entrada al Venturi
- D_2 : diámetro de la garganta
- L_c : longitud de la zona convergente
- L_2 : longitud de la garganta
- L_d : longitud de la zona divergente
- β_1 : ángulo de convergencia
- β_2 : ángulo de divergencia

La longitud de garganta se establece igual al diámetro:

$$L_2 \approx D_2 \quad (18)$$

La longitud de la sección divergente ha de medir como mínimo cuatro veces el diámetro de la garganta con el fin de garantizar el tiempo de contacto de las partículas contenidas en el gas con las gotas de agua atomizadas.

$$L_d \approx 4 \cdot D_2 \quad (19)$$

La longitud de la zona convergente se puede calcular a partir del ángulo de convergencia, β_1 . El ángulo de convergencia recomendado es $12,5^\circ$.

$$L_c = \frac{\frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2}}{\text{tg}(\beta_1)} \quad (20)$$

8.4.10. Consumo de energía

La potencia necesaria en el sistema se calcula en función del caudal de aire a tratar y la caída de presión a través de la torre de lavado.

$$P(W) = Q_G \cdot \Delta P \quad (21)$$

8.4.11. Razón de drenado del líquido lavador

La cantidad de líquido lavador que se debe renovar debido a que como consecuencia del continuo lavado del gas su concentración en sólidos ha alcanzado un valor límite establecido, $m_{\text{sólidos}}$, se puede estimar como:

$$Q_{\text{drenado}} = \frac{\dot{m}_{MP}}{[\text{partículas}_{\text{aguarecirculación}}] \cdot \rho_{H2O}} \quad (22)$$

donde,

$$\dot{m}_{MP} = \eta \cdot [\text{partículas}_{\text{entrada}}] \cdot Q_G \quad (23)$$

siendo \dot{m}_{MP} el caudal másico de materia particulada captado por el flujo de líquido y η el rendimiento de captación de partículas del lavador.

8.4.12. Cálculos

Caudal de agua mínimo para disolver los contaminantes gaseosos

La cantidad mínima de agua necesaria se va a calcular a partir de los moles de ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico que se ha de eliminar.

La cantidad de HCl y HF que ha de eliminarse para cumplir con el límite legal de emisión es:

$$[HCl_{entrada}] - \text{Límite legal} = 550 - 15 = 535 \text{ mg/Nm}^3$$

$$[HF_{entrada}] - \text{Límite legal} = 2700 - 5 = 2695 \text{ mg/Nm}^3 \text{ (medido como F)}$$

Tal y como se ha presentado anteriormente el caudal de gas a tratar es:

$$Q_{CN} = 24000 \text{ Nm}^3/\text{h} = 6,67 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$Q_{70^\circ\text{C}} = 30153 \text{ m}^3/\text{h} = 8,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para calcular la cantidad de moles de ácidos se ha de emplear la Ecuación 24:

$$n = \frac{m}{PM} \quad (24)$$

Moles de HCl que se han de eliminar:

La cantidad de HCl que se ha de eliminar es 535 mg/Nm³. El peso molecular de este ácido es 36,461 g/mol.

Sustituyendo en la Ecuación 24:

$$n_{HCl} = \frac{0,535 \text{ g}}{\frac{36,461 \text{ g/mol}}{\text{Nm}^3}} = 0,0147 \text{ mol HCl/Nm}^3$$

Para convertir los moles de HCl/Nm³ en mol/h, se multiplica por el caudal del gas a tratar en condiciones normales:

$$n_{HCl} = 0,0147 \frac{\text{mol HCl}}{\text{Nm}^3} \cdot 24000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 352,8 \text{ mol HCl/h}$$

Moles de HF que se han de eliminar:

La cantidad de HF que se debe eliminar es 2695 mg/Nm³. El peso molecular del ácido fluorhídrico es 20,006 g/mol.

Sustituyendo en la Ecuación 24:

$$n_{HF} = \frac{2,695 \text{ g}}{\frac{20,006 \text{ g/mol}}{\text{Nm}^3}} = 0,135 \text{ mol HF/Nm}^3$$

Calculado como mol/h:

$$n_{HF} = 0,135 \frac{\text{mol HF}}{\text{Nm}^3} \cdot 24000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 3240 \text{ mol HF/h}$$

Moles de H₂O para captar el HCl y HF contenido en la corriente residual:

Las reacciones de disociación del HCl y el HF en H₂O se presentan a continuación:



Con lo cual para disociar un mol de HCl será necesario un mol de agua e ídem con el ácido fluorhídrico.

$$352,8 \text{ mol HCl/h} + 3240 \text{ mol HF/h} = 3592,8 \text{ mol H}_2\text{O/h}$$

El peso molecular del agua es 18,015 g/mol. Despejando el valor de la masa en la Ecuación 24 y sustituyendo:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 3592,8 \text{ mol H}_2\text{O/h} \cdot 18,015 \text{ g/mol} = 64119 \text{ gH}_2\text{O/h} \approx 64,2 \text{ kg/h}$$

El valor de la densidad del agua es 1000 kg/m³. Para realizar los cálculos no se tendrá en cuenta la variación de la densidad del agua en función de la temperatura ni de la presión. Si se divide el caudal másico de agua obtenido entre la densidad del agua, se obtiene el caudal de agua mínimo a emplear:

$$Q_{L,min} = \frac{64,2 \text{ kg/h}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,0642 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para eliminar el 100% de los contaminantes el caudal de agua necesario sería:

$$Q_L = 0,06446 \text{ m}^3/\text{h} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Relación de líquido a gas

Conociendo el caudal de gas a la entrada del lavador, $Q_G=8,38 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones de trabajo 70° y 1 atm , y el caudal mínimo de líquido a emplear, $Q_{L,min}$, se va a calcular a partir de la ecuación 10, la relación mínima. Sustituyendo en la Ecuación 13:

$$R_{min} = \frac{64,2/3600}{6,67} = 0,00267 \text{ l/Nm}^3$$

Se obtiene una relación muy inferior a la mínima recomendada de 1 l/Nm^3 . Para estar del lado de la seguridad se tomará un valor de R superior al mínimo recomendado, sin alcanzar el máximo:

$$R = 2,67 \text{ l/Nm}^3$$

Velocidad del gas en la garganta

Para el diseño del Venturi se va a establecer una velocidad del gas en la garganta, $V_G=90\text{m/s}$.

Diámetro de la garganta

Despejando el área de la Ecuación 12 y sustituyendo:

$$A_2 = \frac{8,38}{90} = 0,093 \text{ m}^2$$

Despejando el diámetro de la Ecuación 11 y sustituyendo:

$$D_2 = \sqrt{4 \cdot \frac{A_2}{\pi}}$$

$$D_2 = 344 \text{ mm}$$

Caudal líquido de lavado

Para calcular el líquido de lavado necesario a partir de la relación líquido a gas establecida, se despeja Q_L de la Ecuación 13 y se sustituyen los valores:

$$Q_L = 2,67 \cdot 6,67 = 17,81 \text{ l/s} = 0,018 \text{ m}^3/\text{s}$$

La cantidad de líquido a utilizar es superior al caudal calculado para la eliminación de los contaminantes gaseosos; por tanto, se estima que con este caudal se disolverá la totalidad de los contaminantes en el agua de lavado.

Caída de presión

Para el cálculo de la caída de presión al atravesar la garganta se utilizará la Ecuación 14:

$$\Delta P = 0,1 \cdot 90^2 \cdot 0,00213 = 1,73 \text{ mmH}_2\text{O} = 17 \text{ Pa}$$

Tamaño de gota promedio

Sustituyendo en la Ecuación 15:

$$d_g = \frac{4900}{90} + 30 \cdot 0,00213^{1,5} = 54,45 \approx 54 \text{ }\mu\text{m}$$

Factor inercial de impacto y eficiencia para cada uno de los tamaños de partícula

Para poder calcular la eficiencia en función del tamaño de partícula es necesario conocer el factor inercial de impacto en función del tamaño. La densidad de las partículas es 2870 kg/m^3 y la viscosidad dinámica del gas a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ es igual a $2,052 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$.

Ejemplo de cálculo para $d_p=300 \text{ }\mu\text{m}$:

Factor inercial de impacto, sustituyendo en la Ecuación 16:

$$\psi_i = \frac{(300 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2870 \cdot 90}{9 \cdot 2,052 \cdot 10^{-5} \cdot 54 \cdot 10^{-6}} = 2331059,13$$

Eficiencia de captación, sustituyendo en la Ecuación 17:

$$\eta_{7,5} = (1 - e^{-1 \cdot 0,00213 \cdot 2331059,13^{0,5}}) \cdot 100 = 96,13 \%$$

En la Tabla 15 se recogen los factores inerciales para cada tamaño de partícula, así como la eficiencia de captación para cada uno de los tamaños. Se observa que los mayores rendimientos se obtienen para las partículas de mayor tamaño.

Tabla 15: Factor inercial de impacto y eficiencia de captación en función del tamaño de partícula para $V_G=90$ m/s y $R=0,00213$ l/m³.

Tamaño medio d_p (μm)	Factor inercial Ψ_i	η_i (%)
7,5	1456,91	7,81
25	16187,91	23,74
50	64751,64	41,84
75	145691,20	55,65
100	259006,57	66,18
150	581764,78	80,33
200	1036026,28	88,56
250	1618791,06	93,35
300	2331059,13	96,13

Eficiencia global

A partir de la Ecuación 6 se puede calcular la eficiencia global del lavador en cuanto a captación de partículas sólidas:

$$\eta_{particulas} = \frac{7,81}{100} \cdot 64,13 + \frac{23,74}{100} \cdot 21,18 + \frac{41,84}{100} \cdot 6,98 + \frac{55,65}{100} \cdot 5,28 + \frac{66,18}{100} \cdot 1,51 + \frac{80,33}{100} \cdot 0,51 + \frac{88,56}{100} \cdot 0,29 + \frac{93,35}{100} \cdot 0,07 + \frac{96,13}{100} \cdot 0,06 = 17,67 \%$$

En la Tabla 16 se presenta la concentración de partículas a la entrada del Venturi y a la salida del mismo.

La concentración de partículas a la salida del lavador es:

$$\sum [Part. Salida_i] = 30,12 \text{ mg/Nm}^3 < 50 \text{ mg/Nm}^3$$

Por lo tanto, el contenido en partículas de la corriente gaseosa tras abandonar el equipo diseñado se encuentra por debajo del límite legal establecido en la Autorización Ambiental Integrada.

El rendimiento global de captación de ácidos es del 100%, pues el caudal de lavado es más elevado que el calculado anteriormente para la eliminación de todos los moles de contaminantes gaseosos, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico.

Tabla 16: Eficiencia de captación en función del tamaño de partícula y concentración de partículas en la corriente de salida.

Tamaño medio d_p (μm)	[Part. Entrada _i]	Porcentaje en peso w_i (%)	η_i (%)	[Part. Salida _i]
7,5	23,46	64,13	7,81	21,63
25	7,75	21,18	23,74	5,91
50	2,55	6,98	41,84	1,48
75	1,93	5,28	55,65	0,86
100	0,55	1,51	66,18	0,19
150	0,19	0,51	80,33	0,04
200	0,11	0,29	88,56	0,01
250	0,02	0,07	93,35	0,002
300	0,02	0,06	96,13	0,001

Dimensiones geométricas

Diámetro de entrada al lavador Venturi:

El diámetro de la tubería que conecta la salida de la cámara de sedimentación con la entrada al lavador Venturi es $D_1=686\text{mm}$. Esta dimensión será igual en el conducto de salida de la zona convergente del lavador.

Longitud de garganta, tal y como se presenta en la Ecuación 18, se puede considerar la longitud igual al diámetro:

$$L_2 = 0,344 \text{ m}$$

Longitud de la sección divergente, sustituyendo en la Ecuación 19:

$$L_d = 4 \cdot 0,344 = 1,376 \approx 1,4 \text{ m}$$

Longitud de la sección convergente, sustituyendo en la Ecuación 20:

$$L_c = \frac{\frac{0,686}{2} - \frac{0,344}{2}}{\operatorname{tg}(12,5^\circ)} = 0,771 \approx 0,8 \text{ m}$$

Consumo de energía

Sustituyendo en la Ecuación 21:

$$P = 8,38 \cdot 17 = 142,46 \text{ W} = 0,143 \text{ kW}$$

Caudal de drenado de agua

Para calcular el caudal de drenado de agua, primero se debe calcular el caudal másico de materia particulada captado por el flujo de líquido. Tal y como se ha presentado al indicar las características de la corriente de gas de entrada al lavador, la concentración de partículas es igual a $37,63 \text{ mg/Nm}^3$ y el caudal de gas es $6,67 \text{ Nm}^3/\text{s}$. Sustituyendo en la Ecuación 23 se obtiene el caudal másico de partículas que es captado por el agua:

$$\dot{m}_{MP} = 1 \cdot 37,63 \cdot 0,1767 \cdot 6,67 = 44,35 \frac{\text{mg}}{\text{s}} = 4,44 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$$

Se considerará que el agua está saturada de sólidos y por ello deberá drenarse cuando contenga el 30% de su flujo en materia particulada.

$$f_{\text{sólidos}} = 0,3$$

Sustituyendo en la Ecuación 22:

$$Q_{\text{drenado}} = \frac{4,44 \cdot 10^{-5}}{0,3 \cdot 1000} = 1,48 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 5,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$$

El caudal de drenado total será el calculado para la saturación de las materias particuladas más el calculado anteriormente para la captación de los ácidos clorhídrico y fluorhídrico.

$$Q_{\text{drenado part+ácidos}} = 5,33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h} + 0,0642 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0647 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para la reacción que se produce en el reactor es necesaria la adición de agua entre 500 y 1000 l/h en cada uno de los reactores. Esta agua se tomará del agua de lavado empleada en el lavador Venturi, por lo que el caudal de drenado real será superior al calculado. No obstante, en el depósito se instalará una válvula de drenado por si fuera necesario su empleo.

Los parámetros calculados para el diseño del lavador Venturi se resumen en la Tabla 17.

Tabla 17: Características teóricas del lavador Venturi.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
v_G	90	m/s
Q_G	8,38	m ³ /s
Q_L	0,018	m ³ /s
R	2,67	l/Nm ³
A_1	0,283	m ²
A_2	0,093	m ²
D_1	0,686	m
D_2	0,344	m
L_2	0,344	m
L_d	1,4	m
L_c	0,8	m
ΔP	17	Pa
d_g	54	μm
$\eta_{partículas}$	17,67	%
$\eta_{ácidos}$	100	%
P	0,143	kW
$Q_{drenado}$	0,0647	m ³ /h

8.4.13. Fabricación del lavador Venturi diseñado

Al igual que en el caso del ciclón, el lavador Venturi diseñado también será construido a medida en una empresa especializada. Para la construcción del Venturi se utilizarán dos tipos de materiales, polipropileno y fibra de vidrio. El polipropileno se empleará en la parte interna del Venturi y del posterior depósito, con un espesor de 13 mm, para que actúe como barrera química ya que es la parte que entra en contacto con el gas y el líquido lavador. En la parte externa de los equipos de esta etapa se empleará fibra de vidrio, 7 mm, con el objetivo de que aporte el refuerzo mecánico necesario.

En el caso del Venturi las dimensiones geométricas obtenidas se van a redondear con el objetivo de que estas medidas sean operativas para la construcción del mismo.

La dimensión más importante es el diámetro de la garganta; teóricamente el valor obtenido ha sido 0,344m. El diámetro de la garganta se va a redondear a 0,35m, por lo tanto:

$$D'_2 = 0,35 \text{ m}$$

Con este nuevo valor se obtiene un perímetro de garganta igual a 1,10 m.

La modificación del diámetro de garganta afecta directamente a la velocidad del gas en la garganta, y con ello, al rendimiento de captación de partículas del ciclón, así como al resto de dimensiones geométricas de la garganta.

A continuación, se realizan de nuevo los cálculos expuestos en el apartado 8.4.12. para $D'_2=0,35$ m.

Área de la garganta:

Sustituyendo en la Ecuación 11,

$$A'_2 = \pi \cdot \left(\frac{0,35}{2}\right)^2 = 0,096 \text{ m}^2$$

Longitud de la garganta:

Se considerará igual al diámetro de garganta,

$$L'_2 = 0,35 \text{ m}$$

Longitud de la sección divergente:

Sustituyendo en la Ecuación 19,

$$L'_d = 4 \cdot 0,35 = 1,4 \text{ m}$$

Longitud de la sección convergente:

Sustituyendo en la Ecuación 20,

$$L'_c = \frac{\frac{0,686}{2} - \frac{0,35}{2}}{\text{tg}(12,5^\circ)} = 0,76 \approx 0,8 \text{ m}$$

Relación de líquido a gas:

Se mantiene el valor de la relación líquido a gas tomado en el apartado anterior, es decir, $R'=2,67$ l/Nm³.

Velocidad del gas en la garganta:

Sustituyendo en la Ecuación 12,

$$v'_G = \frac{8,38}{0,096} = 87,3 \text{ m/s}$$

Tamaño de gota medio:

Sustituyendo en la Ecuación 15,

$$d'_g = \frac{4900}{87,3} + 30 \cdot 0,00213^{1,5} = 56,13 \approx 56 \mu\text{m}$$

Factor inercial de impacto y eficiencia para cada uno de los tamaños de partícula

El factor inercial de impacto se calcula sustituyendo en la Ecuación 16 para cada tamaño de partícula. Una vez obtenido el factor inercial de impacto se sustituye en la Ecuación 17 para obtener la eficiencia de captación para los diferentes tamaños de partícula.

Tabla 18. Factor inercial de impacto y eficiencia de captación en función del tamaño de partícula recalculados para $v'_G=87,3 \text{ m/s}$ y $R'=2,67 \text{ l/m}^3$.

Tamaño medio d_p (μm)	Factor inercial Ψ'_i	η'_i (%)
7,5	1362,73	7,56
25	15141,48	23,06
50	60565,91	40,80
75	136273,30	54,45
100	242263,65	64,95
150	545093,20	79,25
200	969054,58	87,71
250	1514147,78	92,73
300	2180372,81	95,69

Eficiencia global

Al igual que en el primer cálculo la eficiencia para la captación de gases es del 100%. Para conocer la eficiencia en cuanto a captación de partículas se ha de utilizar la Ecuación 6:

$$\eta'_{particulas} = \frac{7,56}{100} \cdot 64,13 + \frac{23,06}{100} \cdot 21,18 + \frac{40,80}{100} \cdot 6,98 + \frac{54,45}{100} \cdot 5,28 + \frac{64,95}{100} \cdot 1,51 + \frac{79,25}{100} \cdot 0,51 + \frac{87,71}{100} \cdot 0,29 + \frac{92,73}{100} \cdot 0,07 + \frac{95,69}{100} \cdot 0,06 = 17,21 \%$$

Por lo tanto, la concentración de partículas a la salida del Venturi se presenta en la Tabla 19.

Tabla 19: Eficiencia de captación en función del tamaño de partícula y concentración de partículas en la corriente de salida.

Tamaño medio d_p (μm)	[Part. Entrada _i]	Porcentaje en peso w_i (%)	η'_i (%)	[Part. Salida' _i]
7,5	23,46	64,13	7,56	21,69
25	7,75	21,18	23,06	5,96
50	2,55	6,98	40,80	1,51
75	1,93	5,28	54,45	0,88
100	0,55	1,51	64,95	0,19
150	0,19	0,51	79,25	0,04
200	0,11	0,29	87,71	0,01
250	0,02	0,07	92,73	0,002
300	0,02	0,06	95,69	0,001

La concentración de partículas a la salida del lavador diseñado es:

$$\sum [Part. Salida'_i] = 30,283 \text{ mg/Nm}^3 < 50 \text{ mg/Nm}^3$$

Pese a que en el lavador Venturi no se elimina la totalidad de las partículas, la concentración de partículas a la salida del equipo es inferior al límite legal.

Caída de presión

Sustituyendo en la Ecuación 14:

$$\Delta P' = 0,1 \cdot 87,3^2 \cdot 0,00213 = 1,62 \text{ mmH}_2\text{O} = 15,91 \text{ Pa}$$

Consumo de energía:

Sustituyendo en la Ecuación 21:

$$P' = 8,38 \cdot 15,91 = 133,32 \text{ W} = 0,133 \text{ kW}$$

Caudal de drenado

Se mantiene igual al calculado en el apartado anterior, $Q'=0,0647 \text{ m}^3/\text{h}$.

En la Tabla 20 se representan las características del lavador Venturi que finalmente será construido.

Tabla 20. Características finales del lavador Venturi.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
V'_G	87,30	m/s
Q_G	8,38	m^3/s
Q'_L	0,018	m^3/s
R'	2,67	l/Nm^3
A_1	0,283	m^2
A'_2	0,096	m^2
D_1	0,686	m
D'_2	0,35	m
L'_2	0,35	m
L'_d	1,40	m
L'_c	0,80	m
$\Delta P'$	15,91	Pa
d'_g	56	μm
$\eta'_{\text{ácidos}}$	100	%
$\eta'_{\text{partículas}}$	17,21	%
P'	0,133	kW
Q'_{drenado}	0,0647	m^3/h

De los parámetros presentados en la Tabla 20 cabe destacar que al aumentar el diámetro de la garganta se ha logrado reducir la pérdida de carga causada al atravesar la garganta y con ello disminuir el consumo de energía; todo ello, sin reducir apenas el rendimiento de captación del Venturi.

Una vez conocidos los parámetros y medidas exactas del Venturi que se ha diseñado, se va a proceder a diseñar el depósito acumulador de líquido de lavado colocado a la salida de la garganta. También se va a seleccionar el modelo del separador de gotas que se ha de instalar en la parte superior del depósito, previamente a la salida de los gases hacia la chimenea de evacuación, con el objetivo de impedir el arrastre de agua hacia el exterior.

Depósito acumulador del agua de lavado

Los gases al salir de la garganta atraviesan un depósito donde se almacena el agua que arrastran. El líquido lavador cae al fondo del depósito por acción de la gravedad y del

separador de gotas. Las partículas contenidas en el agua de lavado decantan al fondo del depósito, permitiendo la reutilización de este líquido.

El caudal de líquido constante que se inyecta en la garganta del Venturi es $0,018 \text{ m}^3/\text{s}$. El depósito ha de tener capacidad suficiente para almacenar el volumen de agua necesario para al menos 3 minutos; se ha de tener en cuenta que el agua es impulsada por una bomba hasta la garganta del Venturi. La inyección del agua en la garganta conlleva un tiempo, en el cual el nivel de agua en el depósito no puede bajar de un límite establecido con el objetivo de que la bomba esté en constante funcionamiento.

El volumen de agua en el depósito se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H \quad (27)$$

donde:

- D, diámetro del depósito
- H, altura del agua dentro del depósito.

El volumen de agua necesario en 3 minutos es,

$$V = 3 \cdot 60 \cdot 0,018 \text{ m}^3/\text{s} = 3,24 \text{ m}^3$$

La altura total del equipo no ha de sobrepasar los 8,5 m, debido a cuestiones de espacio disponible dentro de la ubicación destinada a los equipos donde la altura total es igual a 11 m. La altura de la garganta Venturi, calculada como la suma de las longitudes convergente, de garganta y divergente, y del diámetro de salida es 3,4 m. Por lo tanto, la altura del agua dentro del depósito puede alcanzar hasta 5,1 m. Partiendo del valor calculado, la altura del agua se estimará en 0,75 m. Despejando el diámetro en la Ecuación 27 y sustituyendo la altura y el volumen:

$$D = \sqrt{\frac{V \cdot 4}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{3,24 \cdot 4}{\pi \cdot 0,75}} = 2,35 \approx 2,50 \text{ m}$$

Para la instalación de la bomba de impulsión se tendrá en cuenta que la toma de agua se realizará a 0,5 m, medidos desde el suelo, con el objetivo de no arrastrar los fangos acumulados en la parte inferior del depósito como resultado de la captación de partículas.

Separador de gotas

Tal y como se ha explicado anteriormente, en un primer diseño el lavador Venturi será el último equipo del sistema, previamente a la expulsión de los gases a través de la chimenea. Es por ello, que en la parte superior del depósito de salida debe contar con un separador de gotas (también conocido como eliminador de neblina) que impida el arrastre de las gotas de agua hasta el exterior.

Se distingue entre dos tipos de separadores: de malla o de placas. En los separadores de malla las gotas se acumulan formando gotas de diámetro mayor hasta que se desprenden de la malla. En los separadores de placa se fuerza al gas a atravesar placas colocadas en diferentes geometrías por las cuales las gotas resbalan y caen.

Para este caso, se va a optar por un separador de gotas de placas, debido a que la pérdida de carga a través de estos es menor que en un separador de malla.

Se ha escogido un separador de gotas fabricado por la empresa *Brentwood Industries*. El modelo escogido es un eliminador de rocío celular, denominado CF80Max. La estructura de este separador se puede observar en la Figura 19. Para atravesar el eliminador, el gas ha de realizar tres cambios de direcciones, lo que provoca que las gotas de agua choquen contra las paredes y precipiten.

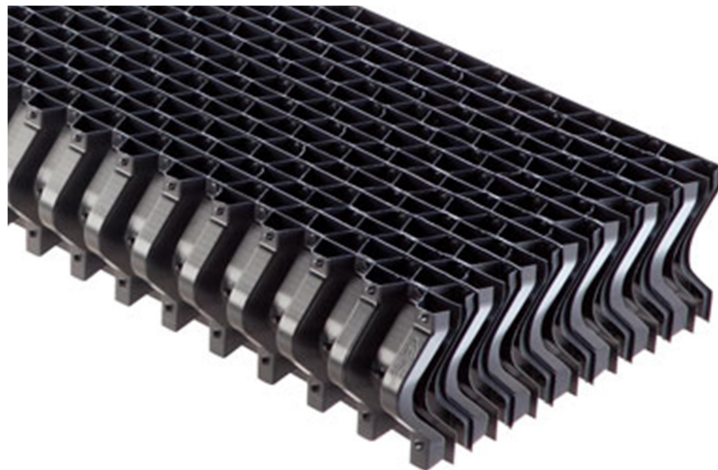


Figura 19. Separador de gotas celular, CF80Max. [21]

El fabricante del separador de gotas facilita las siguientes características del producto:

- El producto se fabrica en PVC.
- El tamaño de la celda es 21,8 mm.
- El espesor del separador es 133 mm.
- El separador se fabrica en módulos. Esto permite que, acoplando módulos, se pueda adaptar al diámetro del depósito.

- Para conocer la pérdida de carga, el fabricante facilita una gráfica de la pérdida de carga en función de la velocidad del gas y el modelo, (Figura 20).

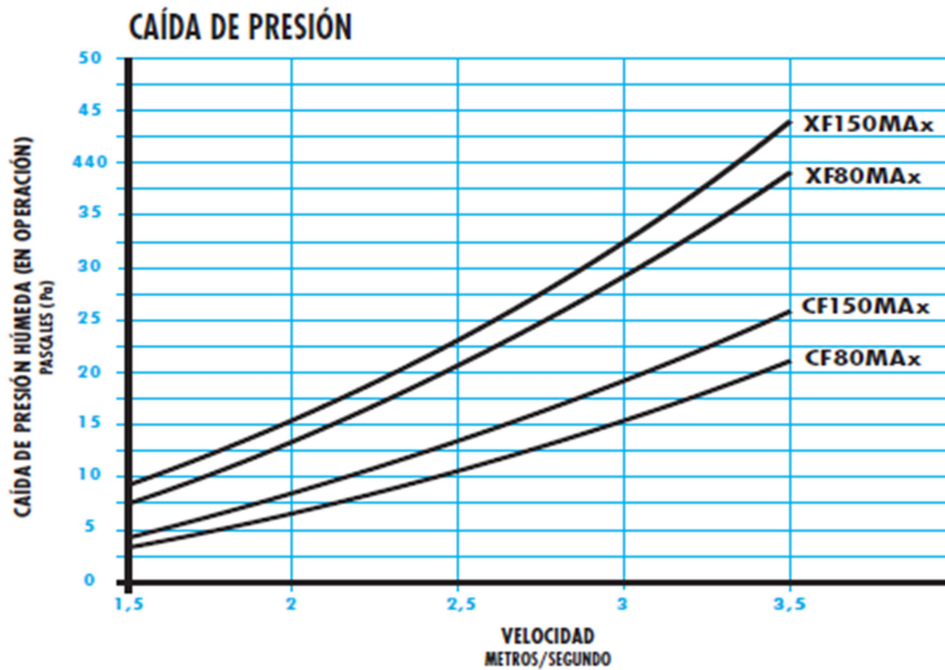


Figura 20. Gráfica de la caída de presión al atravesar el separador de gotas en función del modelo y de la velocidad. [21]

La velocidad del gas al atravesar el depósito acumulador de agua se puede calcular sustituyendo en la Ecuación 2:

$$v = \frac{8,38}{\pi \cdot \left(\frac{2,5}{2}\right)^2} = 1,71 \text{ m/s}$$

Conociendo la velocidad del gas y el modelo del separador, a partir de la Figura 16, se puede conocer la caída de presión, la cual es aproximadamente igual a 5 Pa.

El separador de gotas se colocará a una distancia aproximadamente de 650 mm de la evacuación de los gases del lavador.

Los detalles dimensionales del lavador Venturi: garganta, depósito y separador de gotas, se pueden observar en el Plano nº2.

8.5. TORRE DE ASPERSIÓN

Por último, pese a que con los rendimientos obtenidos en los dos equipos diseñados previamente se eliminan la totalidad de los contaminantes, se va a realizar el diseño de una torre de aspersión por si tras la puesta en marcha de la instalación fuera necesaria su instalación por no alcanzar los rendimientos previstos. Es por ello que se proyectarán los planos dejando un espacio para dicha torre.

El lavador que se va a diseñar es una torre de aspersión vertical con flujo en contracorriente.

8.5.1. Diámetro de la torre

Para determinar el diámetro de la torre se ha de establecer la velocidad del gas a través del lavador. Thakore y Bhatt indican en su libro *Introduction to Process Engineering and Design* [22] que la velocidad máxima que el gas ha de alcanzar al atravesar torres de aspersión verticales ha de ser 2,3 m/s. Una vez fijada la velocidad del gas, el diámetro de la torre se puede calcular con la Ecuación 28.

$$D = \sqrt{\frac{Q_G \cdot 4}{v_G \cdot \pi}} \quad (28)$$

8.5.2. Tiempo de residencia

El tiempo de residencia de la fase líquida dentro de la torre de aspersión se encuentra entre 1 y 10 s [16]. A mayor tiempo de residencia mayor rendimiento de captación y eliminación.

8.5.3. Altura de la torre

La altura de la torre en la cual el gas está en contacto con el líquido de lavado se puede calcular a través de la Ecuación 29 (caudal es igual a volumen partido por tiempo), conocido el diámetro de la torre y estableciendo un tiempo de residencia.

$$Q_G = \frac{V}{t_r} = \frac{H \cdot A}{t_r} = \frac{H \cdot \pi \cdot r^2}{t_r} \quad (29)$$

8.5.4. Líquido lavador

El líquido lavador seleccionado para la torre de aspersión es agua. Como ya se ha comentado anteriormente en el diseño del lavador Venturi, la elección de agua como líquido lavador se debe a que se van a captar partículas y los ácidos clorhídrico y fluorhídrico son ácidos fuertes.

El consumo de líquido en una torre de aspersión se encuentra entre 3 y 16 l/m³ de gas a tratar [23].

8.5.5. Esquema de la distribución interna de la torre

Dentro de la torre de aspersión se ha de distribuir un soporte para los aspersores, un separador de gotas en la parte superior y se ha de calcular el volumen de agua necesario que se ha de almacenar en la parte inferior de la torre para la recirculación de la misma a través de los aspersores. En la Figura 21 se puede observar un esquema del interior de la torre.

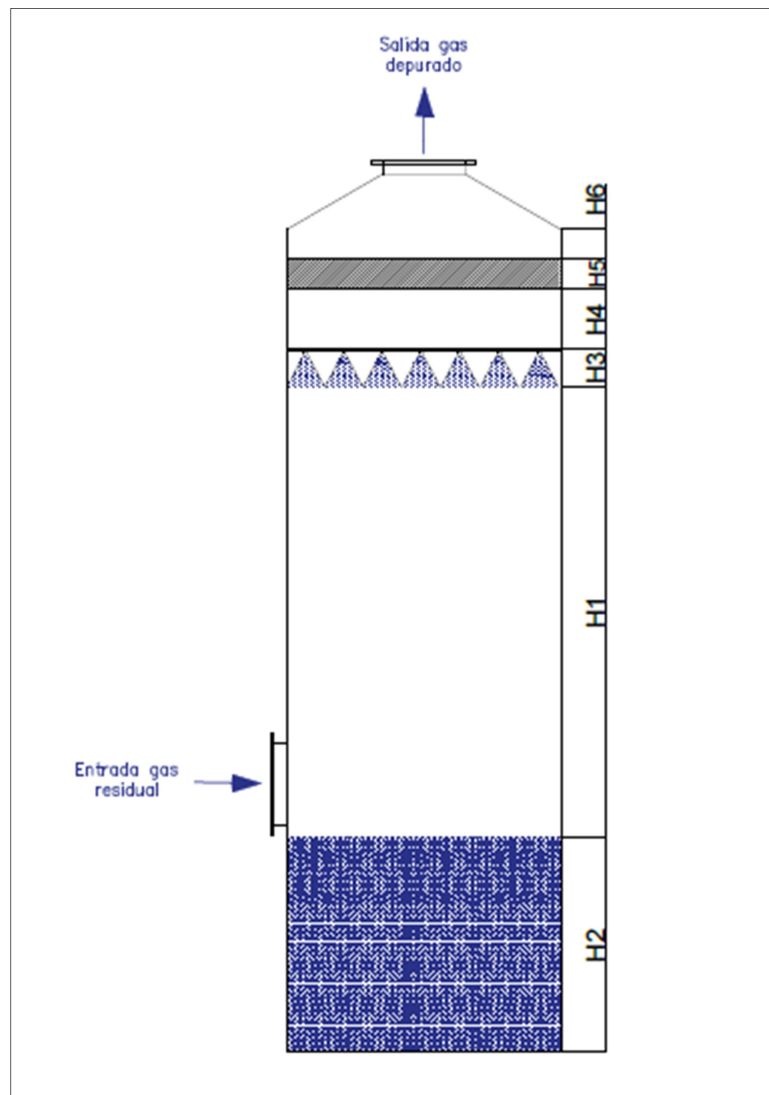


Figura 21. Esquema del interior de la torre de aspersión.

donde,

- H1: altura de la torre en la cual el gas está en contacto con el líquido de lavado
- H2: altura del depósito en la que se almacena el agua de lavado para ser recirculada

- H3: distancia desde los aspersores hacia el fondo en la cual el diámetro completo de la torre se encuentra cubierto de agua
- H4: distancia entre los aspersores y el separador de gotas
- H5: espesor del separador de gotas
- H6: distancia entre el separador de gotas y la parte superior de la torre.

8.5.5. Cálculos

La velocidad del gas a través de la torre se estima en un 66% de la velocidad máxima recomendada, es decir, 1,518 m/s. El caudal de gas, calculado anteriormente, es 8,38 Nm³/s.

Diámetro interior de la torre

Sustituyendo en la Ecuación 28,

$$D = \sqrt{\frac{8,38 \cdot 4}{1,518 \cdot \pi}} = 2,65 \text{ m}$$

Altura de la torre

Para poder realizar el cálculo de la altura de la torre en la cual el gas está en contacto con el líquido de lavado el tiempo de residencia se fija en 5s. Despejando la altura de la Ecuación 29 y sustituyendo,

$$Q_G = \frac{H_1 \cdot \pi \cdot r^2}{t_r} \rightarrow H_1 = \frac{Q_G \cdot t_r}{\pi \cdot r^2} = \frac{8,38 \cdot 5}{\pi \cdot 1,325^2} = 7,6 \text{ m}$$

Consumo mínimo de líquido lavador

Fijando el consumo de agua en 3 l/m³ de gas a tratar [23], se obtiene un caudal de líquido de lavado igual a:

$$Q_L = 3 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \cdot 8,38 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 25,14 \text{ l/s}$$

El líquido lavador se almacena en el inferior de la torre de aspersión y se recircula hasta que se satura de contaminantes.

Caudal de drenado

Tal y como se ha comentado en el diseño del lavador Venturi, durante la fabricación es necesario un caudal de agua constante en los reactores que fluctúa entre 500 y 1000 l/h en cada uno de los reactores. Por lo tanto, este será el caudal de drenado real. Al igual que en el Venturi, se instalará un sistema de purgado automático por si fuera necesaria su utilización.

En la Tabla 21 se resumen los valores de las características de la torre calculados en este apartado.

Tabla 21. Características teóricas de la torre de aspersión.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
v_G	1,518	m/s
D	2,65	m
t_r	5	s
H_1	7,6	m
Q_L	$25,14 \cdot 10^{-3}$	m^3/s

8.5.5. Fabricación de la torre de aspersión diseñada

Al igual que en los equipos diseñados anteriormente, la fabricación de la torre de aspersión será realizada por una empresa especializada en ello. Igual que en la etapa anterior, los materiales utilizados para la torre de aspersión serán polipropileno en el interior de la misma y fibra de vidrio para el exterior.

Con el objetivo de facilitar la construcción de la misma el diámetro de la torre será igual a 3 m, diámetro estándar de fabricación para la empresa. Al modificar el diámetro de la torre, la velocidad del gas y la altura de la torre varían.

Velocidad del gas a través del lavador

Despejando el valor de la velocidad de la Ecuación 28,

$$v'_G = \frac{8,38}{\pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 1,19 \text{ m/s}$$

Altura de la torre, H'_1

Despejando la altura de la Ecuación 29 y sustituyendo,

$$H'_1 = \frac{8,38 \cdot 5}{\pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 5,93 \approx 6 \text{ m}$$

El tiempo de residencia con una altura de 6 m será, despejando el tiempo en la Ecuación 29,

$$t'_r = \frac{H'_1 \cdot \pi \cdot r'^2}{Q_G} = \frac{6 \cdot \pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2}{8,38} = 5,06 \text{ s}$$

8.5.6. Aspersores

El líquido de lavado se difumina en el interior de la torre a través de unos aspersores, en los cuales se inyecta agua a presión mediante una bomba. Con el objetivo de que todo el caudal de gas se rocíe con el líquido lavador, la distribución de los aspersores ha de ser tal que el agua quede distribuida por todo el diámetro de la torre en la menor altura posible.

Antes de realizar la distribución de los aspersores se ha realizado una búsqueda de los aspersores disponibles comercialmente con el objetivo de elegir el modelo más adecuado para la torre de aspersión.

El modelo escogido es un aspersor de cono lleno con apertura amplia empleado en tecnologías de control de emisiones fabricado por la empresa VerleK, modelo FC-FX. El aspersor está fabricado en acero inoxidable. El aspersor produce un aerosol en forma de cono realizando una distribución uniforme del fluido, tal y como se puede observar en la Figura 22.

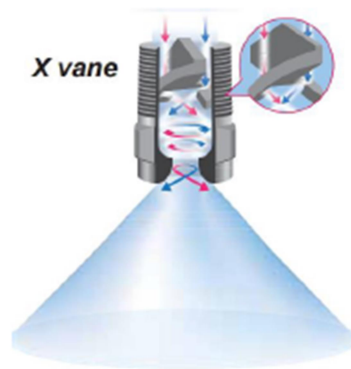


Figura 22. Distribución del fluido por el aspersor. [24]

Dentro del modelo de aspersor escogido se pueden seleccionar diferentes dimensiones para el aspersor; en función del diámetro del aspersor, la presión del fluido y la capacidad en l/min, se obtendrá un ángulo de pulverización determinado. Estos datos se presentan en la Figura 23.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

Inlet Thread	Capacity Code	Spray Orifice Dia. (MM)	Max. Free Passage Dia. (MM)	Capacity(L/min) at different pressure values (bar)									Spay Angle(°)		
				0.7 bar	1 bar	1.5 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	0.5 bar	1.5 bar	6 bar
1/8	1	0.79	0.64	0.38	0.44	0.54	0.62	0.74	0.85	0.94	1.0	1.1	50°	58°	53°
	1.5	1.19	0.64	0.57	0.69	0.81	0.93	1.1	1.3	1.4	1.5	1.7	52°	65°	59°
	2	1.19	1.02	0.76	0.92	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0	2.2	43°	50°	46°
	3	1.59	1.02	1.1	1.4	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.1	3.3	52°	65°	59°
	3.5	1.59	1.27	1.3	1.6	1.9	2.2	2.6	3.0	3.3	3.6	3.9	43°	50°	46°
	3.9	1.98	1.02	1.5	1.8	2.1	2.4	2.9	3.3	3.7	4.0	4.3	77°	84°	79°
	5	1.98	1.27	1.9	2.3	2.7	3.1	3.7	4.2	4.7	5.1	5.5	52°	65°	59°
1/4	6.1	2.28	1.27	2.3	2.8	3.3	3.8	4.5	5.2	5.7	6.2	6.7	69°	74°	68°
	6.5	2.38	1.59	2.5	3.0	3.5	4.0	4.8	5.5	6.1	6.7	7.1	45°	50°	46°
	10	3.18	1.59	3.8	4.7	5.4	6.2	7.4	8.5	9.4	10.2	11.0	58°	67°	61°
3/8	12.5	3.2	1.59	4.8	5.8	6.8	7.7	9.3	10.6	11.8	12.8	13.7	69°	74°	68°
	9.5	2.6	2.38	3.6	4.4	5.1	5.9	7.1	8.1	8.9	9.7	10.4	45°	50°	46°
	15	3.6	2.38	5.7	6.9	8.1	9.3	11.2	12.7	14.1	15.4	16.5	64°	67°	61°
	20	4.0	2.78	7.6	9.2	10.8	12.4	14.9	17.0	18.8	20	22	76°	80°	73°
1/2	22	4.5	2.78	8.4	10.2	11.9	13.6	16.4	18.7	21	23	24	87°	90°	82°
	16	3.5	3.18	6.1	7.4	8.7	9.9	11.9	13.6	15.1	16.4	17.6	48°	50°	46°
	25	4.6	3.18	9.5	11.6	13.5	15.4	18.6	21	24	26	27	64°	67°	61°
	32	5.2	3.57	12.2	14.7	17.3	19.8	24	27	30	33	35	72°	75°	68°
	40	6.2	3.57	15.2	18.5	22	25	30	34	38	41	44	88°	91°	83°
	50	6.7	3.97	19.1	23.1	27	31	37	42	47	51	55	91°	94°	86°

Figura 23. Ángulo de pulverización del modelo FC-FX en función de la presión del fluido y el diámetro del aspersor. [24]

El caudal de líquido que se ha de pulverizar es 25,14 l/s, es decir, 1508,4 l/min. La presión a la que se va a bombear el fluido será 3 bares. El modelo de difusor elegido es de ½ pulgada, código de capacidad 50; la capacidad de este modelo a la presión de 3 bares es 37 l/min. El ángulo de pulverización se estimará igual al indicado para 6 bares por ser el más restrictivo, 86°, y no tener datos para 3 bares.

Para realizar la distribución de los difusores en el área de la torre de lavado se ha elegido un diámetro de pulverización igual a 600 mm. La distribución de los difusores se puede observar en la Figura 24. Con esta distribución se colocarán 21 difusores; la capacidad de cada difusor es de 37 l/min. Entonces el caudal será igual a 777 l/min, aproximadamente la mitad del caudal necesario calculado anteriormente, por lo que es necesario que se coloquen dos niveles de difusores. Al colocar dos niveles de difusores, el caudal total será igual a 1554 l/min. Por lo tanto, el consumo de agua será 3,09 l/m³ de gas a tratar, muy similar al elegido anteriormente de 3 l/m³.

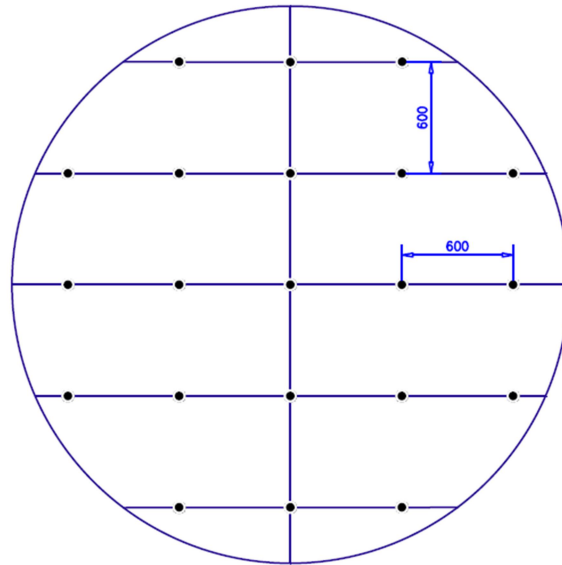


Figura 24. Distribución de los difusores en el área de la torre.

A continuación, se va a realizar el cálculo de la altura H_3 ; en este caso, se trata de la altura a la que los difusores cubren un área circular de diámetro igual a 600 mm. En la Figura 25 se ha representado geoméricamente el cono de agua proyectado por el difusor.

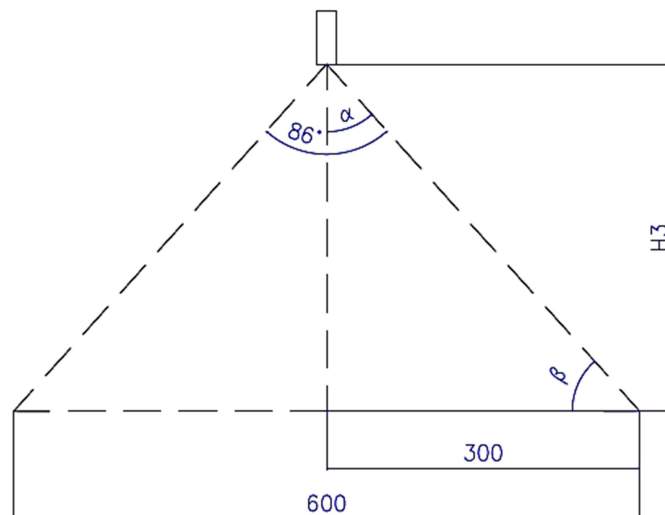


Figura 25. Esquema geométrico del cono generado por el difusor.

Conocido el ángulo de pulverización, 86° , y el diámetro del cono pulverizado, 600 mm, se puede obtener la altura, H_3 , a la cual se alcanza el diámetro buscado.

$$\alpha = \frac{86}{2} = 43^\circ$$

$$\beta = 180 - 90 - 43 = 47^\circ$$

Aplicando relaciones trigonométricas,

$$\tan 47^\circ = \frac{\sin 47^\circ}{\cos 47^\circ} = \frac{\frac{H_3}{\text{hipotenusa}}}{\frac{300}{\text{hipotenusa}}} = \frac{H_3}{300}$$

$$H_3 = 300 \cdot \tan 47^\circ = 321,71 \approx 322 \text{ mm}$$

Tal y como se ha comentado, se van a colocar dos niveles de difusores con igual distribución, pero girados 45° con respecto a la línea central. La finalidad de girar un nivel respecto al otro es abarcar la mayor área de pulverización posible, como se puede observar en la Figura 26.

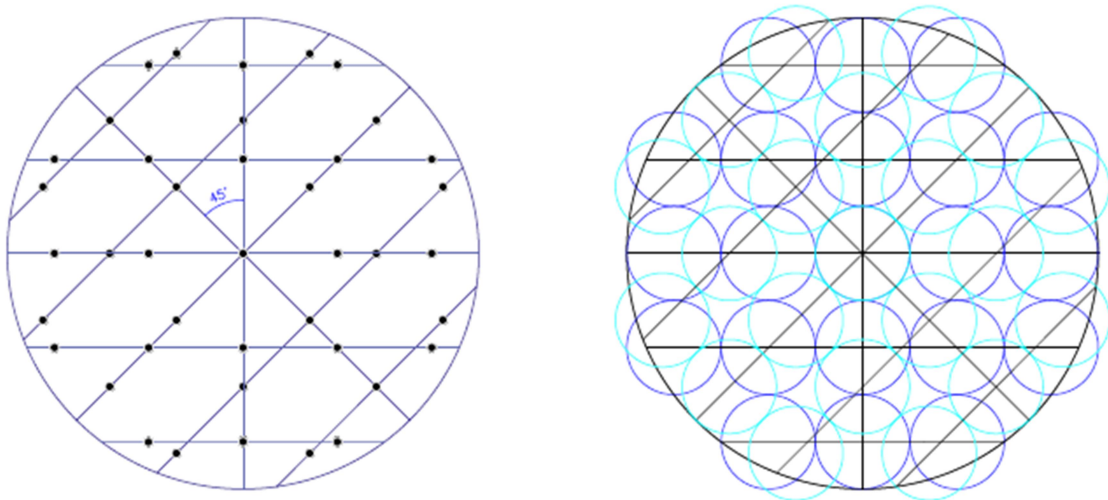


Figura 26. Distribución superpuesta de los dos niveles de difusores.

Al colocarse dos niveles y con el objetivo de no reducir el tiempo de residencia establecido, H_3 se tomará igual al doble del valor calculado, es decir, $H'_3 = 644 \text{ mm}$.

8.5.7. Altura de la torre utilizada como depósito para el agua de lavado

El consumo de agua en la torre es igual a 1554 l/min. La cantidad de líquido que se almacenará en el fondo de la misma será el agua consumida durante 3 minutos,

$$V = 3 \text{ min} \cdot 1,554 \text{ m}^3/\text{min} = 4,662 \text{ m}^3$$

A partir de la Ecuación 27 y conocido el diámetro de la torre, se puede calcular la altura necesaria, H_2 , para almacenar el volumen calculado,

$$H_2 = \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D'}{2}\right)^2} = \frac{4,662}{\pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2} = 0,66 \text{ m}$$

La bomba de impulsión tendrá la toma de agua a 0,30 m, medidos desde el suelo, con la finalidad de no arrastrar los fangos acumulados en la parte inferior de la torre. Si se compara con el diseño del Venturi, la toma de agua para la torre de aspersión se puede colocar más cercana al fondo del depósito debido a que el gas en esta etapa contiene menor concentración de partículas, con lo que la cantidad de fango se verá reducida respecto a la anterior etapa.

8.5.8. Separador de gotas

El separador de gotas instalado en la parte superior de la torre de aspersión será igual al instalado en el lavador Venturi. Por lo tanto, la altura H_5 es 0,133 m. Las características del separador de gotas se han presentado anteriormente en el apartado 8.4.13.

Conocida la velocidad del gas, 1,19 m/s, y el modelo del separador, CF80MAx, a través de la Figura 20 se puede estimar la caída de presión. La caída de presión para este caso es aproximadamente igual a 4 Pa.

8.5.9. Altura total de la torre

La altura total de la torre de aspersión es igual a,

$$H_{total} = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 \quad (30)$$

Las alturas H_4 y H_6 , que hacen referencia a la separación entre los aspersores y el separador de gotas, y el separador de gotas y la salida del gas, respectivamente, se van a fijar igual a 0,12 m.

Sustituyendo en la Ecuación 30,

$$H_{total} = 6 + 0,66 + 0,644 + 0,12 + 0,133 + 0,12 = 7,677 \approx 7,7 \text{ m}$$

Tal y como se ha comentado anteriormente en el diseño del Venturi, por cuestiones de espacio disponible en la ubicación destinada a los equipos, la altura total de la torre ha de ser igual o

inferior a 8 m. Por tanto, se deduce que la altura total de la torre calculada es apta por ser inferior a la altura máxima estipulada.

8.5.10. Pérdida de carga

La pérdida de carga que sufre la corriente gaseosa al atravesar la torre de aspersión es debida a la pérdida ejercida por el agua al chocar contra el gas. La cantidad de agua pulverizada es 1550 l/min, que equivale a 0,026 m³/s. El gas tiene un tiempo de residencia dentro de la torre de 5,06 s; por lo tanto, la cantidad de agua con la que choca el gas es,

$$0,026 \frac{m^3}{s} \cdot 5,06 s = 0,13 m^3$$

Convirtiendo los 0,13 m³ en kp,

$$0,13 m^3 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 N = 1275,3 kp$$

El área de la torre por la que se distribuyen los 0,13 m³ es:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2 = 7,07 m^2$$

Se calculan los kp/cm² ejercidos por el agua,

$$\frac{1275,3 kp}{7,07 \cdot 10^4 cm^2} = 0,018 kp/cm^2$$

Un kp/cm² equivale a 10 mcagua; por tanto, la pérdida de carga que sufre la corriente gaseosa al atravesar la torre de aspersión es 0,18 mcagua.

8.5.11. Resumen de las características y las dimensiones finales de la torre de aspersión diseñada

La distribución final de los equipos en el interior de la torre, así como las dimensiones finales de la misma se pueden observar en el Plano nº 2.

En la Tabla 22 se resumen las características y dimensiones de la torre diseñada.

Tabla 22. Características finales de la torre de aspersión.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
v'_G	1,19	m/s
D'	3	m
t'_r	5,06	s
Q'_L	0,90	l/m ³
H'_1	6	m
H_2	0,66	m
H'_3	0,644	m
H_4	0,12	m
H_5	0,133	m
H_6	0,12	m
H_{total}	7,7	m
nº aspersores	42	uds
Capacidad aspersor	37	l/min
P impulsión	3	bar
Ángulo de pulverización	86	°
Vol. líquido lavado acumulado	4,662	m ³
ΔP torre de aspersión	0,18	mcagua
ΔP (Separador de gotas)	4	Pa

CAPÍTULO 9. CONDUCCIONES

En este capítulo se va a realizar el diseño de las conducciones hidráulicas y de aspiración.

9.1. CONDUCCIONES DE AIRE

Se ha de realizar el diseño de un sistema de extracción localizada, que incluye el diseño del elemento de captación, el sistema de conductos, el depurador (ha sido diseñado anteriormente) y el ventilador.

El material elegido para las conducciones de aspiración es polipropileno cuya resistencia térmica se establece entre 0 y 100 °C, y es resistente químicamente tanto a ácidos como a bases. Además, las conducciones de este material presentan una pared interior lisa que minimiza la pérdida de carga al atravesar la tubería. El proveedor elegido para el suministro de las conducciones es AIQSA, en cuyo catálogo se encuentran los diferentes diámetros de tubería que suministran, Figura 27.

Tubería de ventilación en Polipropileno Homopolímero		
Diámetro exterior mm	e mm	Precio €/m
200	3	18,21
250	3,5	26,67
315	5	47,18
355	5	53,25
400	6	71,66
450	7	93,85
500	8	118,44
560	8	133,37
630	10	187,11
710	12	251,81
800	15	353,32

Barras de 5 m. Color gris RAL 7032.
Según norma DIN 8077.
Para válvulas/accesorios de ventilación consúltenos.

Figura 27. Diámetros de tuberías de ventilación disponibles. [25]

En los apartados siguientes se realizará el diseño de los conductos por tramo y de los elementos de captación de cada reactor. En la Figura 28 se representa el esquema de la

instalación con la nomenclatura para cada tramo de conducto y cada punto en el que se aplicará la Ecuación 31.

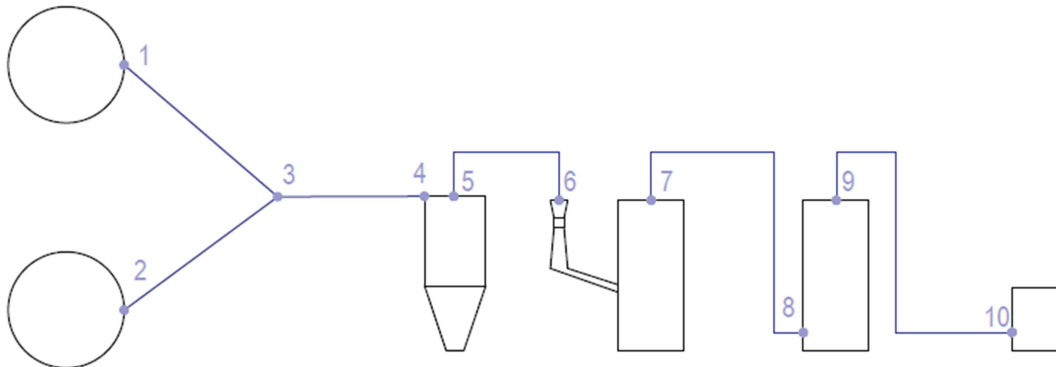


Figura 28. Esquema del sistema de aspiración.

9.1.1. Sistema de conductos

Para determinar el diámetro de las conducciones de aspiración se partirá de la velocidad mínima de diseño de conductos recomendada en función de la naturaleza del contaminante contenido en la corriente residual. En la Tabla 23 se recogen los valores de la velocidad de transporte mínima en función del material conducido a través de la canalización.

Tabla 23. Valores recomendados para la velocidad de diseño de conductos. [26]

NATURALEZA DEL CONTAMINANTE	VELOCIDAD DE DISEÑO (m/s)
Vapores, gases, humos de combustión	Indiferente (la velocidad óptima económicamente suele encontrarse entre 5 y 10 m/s)
Humos de soldadura	10 – 12,5
Polvo muy fino y ligero	12,5 – 15
Polvos secos	15 – 20
Polvo ordinario	17,5 – 20
Polvos pesados	20 – 22,5
Polvo pesado húmedo	> 22,5

La composición del gas que se ha de transportar a través de las conducciones tiene una alta concentración de polvo hasta la entrada del mismo en el ciclón, por ello, para determinar el diámetro, se va a partir de una velocidad de transporte igual o superior a 22,5 m/s.

El cálculo del sistema de aspiración se va a realizar contando con la torre de aspersión debido a que produce mayores pérdidas de carga. Cuando se realice la instalación sin colocar la torre de aspersión el tramo 7-8 ha de tener una longitud en el tramo recto inferior de 14 m hasta la unión con el ventilador.

9.1.1.1. Tramos 1-3 y 2-3

En estos tramos el caudal que se va a conducir es tan solo el correspondiente al captado en cada uno de los reactores, es decir, 4,19 m³/s.

Partiendo de una velocidad igual a 22,5 m/s y despejando el diámetro de la Ecuación 2 se obtiene el diámetro de diseño para estos tramos,

$$D_{1-3;2-3} = \sqrt{\frac{Q_A}{v \cdot \frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{4,19}{22,5 \cdot \frac{\pi}{4}}} = 0,487 \text{ m}$$

Por lo tanto, para que la velocidad del gas a través de los conductos sea superior a 22,5 m/s, el diámetro ha de ser inferior a 487 mm.

En la Figura 27 aparecen los diámetros comerciales disponibles. Tal y como se ha calculado, el diámetro de la tubería de ventilación ha de ser inferior a 487 mm, por lo tanto, el diámetro exterior de tubería que se va a instalar es 500 mm. La tubería consta de un espesor de 8 mm, por lo tanto el diámetro interior de la tubería es igual a 484 mm. A continuación, se va a calcular la velocidad que alcanzará el gas con el diámetro de tubería elegido, para ello se sustituye en la Ecuación 2.

$$v_{1-3;2-3} = \frac{4,19}{\pi \cdot \frac{0,484^2}{4}} = 22,77 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, la velocidad de transporte es superior a 22,5 m/s, debido a que se ha de garantizar el arrastre de una elevada carga de polvo, en concreto, 6000 mg/Nm³.

En estos tramos es necesario colocar un codo de 90° para unir la salida de la chimenea con una tubería recta hasta el punto 3 (Figura 28). Los codos deben de tener un radio de curvatura de 2 a 2,5 veces el diámetro del conducto [26]. Por lo tanto el radio de curvatura del codo que se va a instalar es 1,2 m.

Por cuestiones de producción, en ambos tramos se ha de colocar una válvula de mariposa que permita cerrar el conducto en el supuesto caso en el que solo se trabaje con uno de los dos reactores. Las válvulas estarán colocadas antes de llegar a la unión de ambos conductos, punto 3.

La incorporación de los tramos 1-3 y 2-3 al conducto 3-4 se realizará con un ángulo aproximado de 39°. Se recomienda que el ángulo de incorporación al conducto principal se encuentre entre 30 y 45° con el fin de minimizar turbulencias y evitar la acumulación de partículas [26].

Por lo tanto, ambos tramos están equilibrados en pérdidas y el caudal aspirado de cada reactor será equitativo.

9.1.1.2. Tramos 3-4, 5-6, 7-8 y 9-10

En estos tramos se conduce el caudal correspondiente a los dos reactores, $8,38 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el cálculo del diámetro necesario se va a despejar el diámetro de la Ecuación 2. La velocidad a la que se pretende que fluya el gas es igual que en los tramos anteriores, $22,5 \text{ m/s}$.

$$D_{3-4;5-6;7-8;9-10} = \sqrt{\frac{Q_c}{v \cdot \frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{8,38}{22,5 \cdot \frac{\pi}{4}}} = 0,689 \text{ m}$$

Para que la velocidad en el conducto sea superior a $22,5 \text{ m/s}$ el diámetro ha de ser inferior a 689 mm . Por lo tanto, en la Figura 23 se selecciona el diámetro inmediatamente inferior al calculado, teniendo en cuenta el espesor, este es, 710 mm , cuyo diámetro interior es 686 mm .

Con el diámetro comercial se obtiene la siguiente velocidad,

$$v_{3-4;5-6;7-8;9-10} = \frac{8,38}{\pi \cdot \frac{0,686^2}{4}} = 22,67 \text{ m/s}$$

Tramo 3-4

El conducto que conecta los dos tramos de los reactores con el ciclón es una tubería recta en la cual no es necesario instalar ningún elemento secundario.

Tramo 5-6

Para la conexión del ciclón con el lavador Venturi es necesario colocar dos codos de 90° , cuyo radio de curvatura es 1715 mm .

Tramo 7-8

En este tramo se requieren tres codos como los instalados entre el ciclón y el Venturi.

Tramo 9-10

Entre la torre de aspersión y el ventilador se colocarán tres codos de 90° y radio de curvatura 1715 mm . El último tramo recto de conexión con el ventilador ha de tener una longitud igual o mayor a seis diámetros [26].

9.1.2. Elemento de captación: Campana

El elemento de captación en este caso, es una campana que realiza la aspiración de los gases en la salida del reactor, es decir, en el punto en el que el producto abandona el tromel.

Para el diseño de la campana se ha de partir de la velocidad mínima de captura de los gases necesaria. En función de las dimensiones de la campana se ha de lograr una velocidad de captura entre $2,5$ y 10 m/s , acercándose al límite superior en caso de que se requiera la captación de contaminantes de alta toxicidad, una gran producción o un uso continuado del

equipo [26]. Por lo tanto, se va a establecer una velocidad de captura en la boca de la campana igual a 10 m/s.

La boca de la campana tendrá forma rectangular. Partiendo de la Ecuación 2, se obtiene el área necesaria en la boca de la campana para alcanzar la velocidad de captura deseada. En esta ocasión el área será igual a la de un rectángulo. El caudal que se ha de captar en cada reactor es la mitad del caudal total que es tratado en el sistema de lavado diseñado, es decir, 4,19 m³/s.

$$v = \frac{Q}{A} \rightarrow A = \frac{Q}{v} = \frac{4,19}{10} = 0,419 \text{ m}^2 \rightarrow a \cdot b = 0,419$$

Estableciendo el ancho de la campana igual a 0,5 m, se obtiene un largo de campana igual a 0,84 m. Si se realiza de nuevo el cálculo de la velocidad de captación con la nueva área:

$$v = \frac{4,19}{0,5 \cdot 0,84} = 9,97 \text{ m/s} \approx 10 \text{ m/s}$$

El diámetro de los reactores en los cuales se ha de colocar la campana es de 3400 mm.

La campana ha de unirse progresivamente al conducto del Tramo A, el cual, tal y como se ha calculado, tiene un diámetro igual a 484 mm. Las pérdidas en la entrada de la campana están directamente relacionadas con el ángulo θ , es el ángulo mayor en las campanas rectangulares, representado en la Figura 29. Por otra parte, se ha de cumplir que el ángulo marcado en rojo en la Figura 27 sea mayor o igual a 45°.

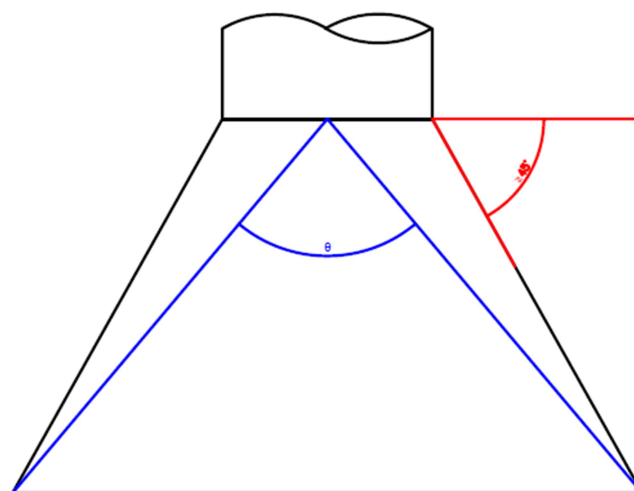


Figura 29. Esquema de una campana.

En la Tabla 24 se detallan los factores de pérdidas en la entrada en función del ángulo θ para el cálculo de las pérdidas de carga en la campana. Las pérdidas se calculan multiplicando el factor de pérdida por la presión dinámica en el conducto al que se une la campana. La presión dinámica para calcular la pérdida se obtiene a partir de la Ecuación 31:

$$PD = \rho \cdot \left(\frac{v}{4,043} \right)^2 \quad (31)$$

Tabla 24. Pérdidas en la entrada de campanas rectangulares. [26]

θ	PÉRDIDA
15°	0,25·PD
30°	0,16·PD
45°	0,15·PD
60°	0,17·PD
90°	0,25·PD
120°	0,35·PD
150°	0,48·PD

En la Tabla 24 se observa que el ángulo θ óptimo para una campana es 45°, pues es el ángulo que minimiza las pérdidas a la entrada.

A continuación, se realiza el cálculo de la altura de la campana necesaria para que el ángulo sea igual a 45°.

$$\tan 22,5 = \frac{\sin 22,5}{\cos 22,5} = \frac{840/2}{h} \rightarrow h = \frac{420}{\tan 22,5} = 1014 \text{ mm}$$

La altura obtenida es demasiado elevada para el espacio disponible. Por lo tanto, se realizará el cálculo para un ángulo de 60°.

$$\tan 30 = \frac{\sin 30}{\cos 30} = \frac{840/2}{h} \rightarrow h = \frac{420}{\tan 30} \approx 728 \text{ mm}$$

En la Figura 29 se representan las dimensiones finales de la campana diseñada.

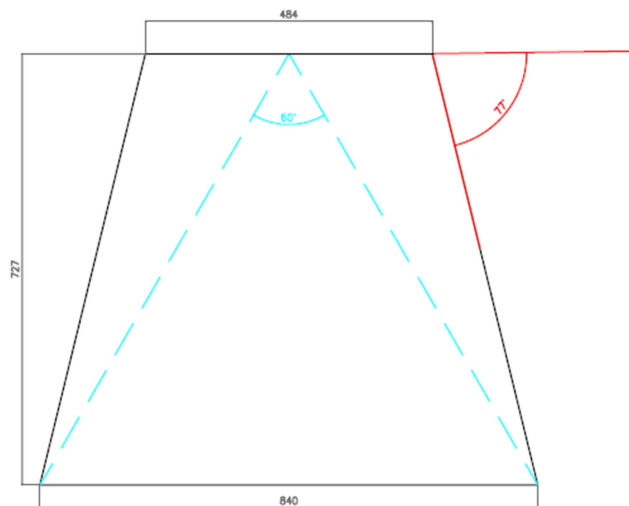


Figura 30. Dimensiones de la campana diseñada.

9.1.3. Pérdidas de carga en el sistema de aspiración

Campana

Las pérdidas de carga a la entrada de la campana, se pueden calcular a partir de la Tabla 24 para un ángulo de 60°. Para obtenerlas se ha de calcular primero la presión dinámica en el conducto al que se une la campana, Ecuación 31. La densidad del gas tal y como se había calculado en capítulos anteriores es 1,029 kg/m³, la velocidad en el conducto es la correspondiente a un diámetro de 484 mm, 22,77 m/s.

$$PD = 1,029 \cdot \left(\frac{22,77}{4,43}\right)^2 = 27,18 \text{ mmcaire}$$

Por tanto, las pérdidas a la entrada de la campana son:

$$h_p = 0,17 \cdot PD = 0,17 \cdot 27,18 = 4,62 \text{ mmcaire}$$

Para poder sumar y comparar pérdidas de carga con el resto de elementos del sistema de lavado de gases, las pérdidas de carga se han de convertir a mmcagua, para ello se utilizará la siguiente expresión:

$$h(\text{mcagua}) = \frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{agua}}} \cdot h(\text{mcaire}) \quad (32)$$

Sustituyendo los valores de la densidad en la Ecuación 32 se obtiene la siguiente relación entre $mcaire$ y $mmcagua$,

$$h (mmcagua) = 1,029 \cdot h (mcaire) \quad (33)$$

Por tanto, las pérdidas en la campana equivalen a 4,75 mmcagua.

Conductos

Para el cálculo de pérdidas de carga en conductos se va a utilizar la ecuación de Darcy-Weisbach para tubería circular, en la cual se relaciona la longitud de la tubería, el factor de fricción y el diámetro de la misma con el caudal del fluido transportado [27].

$$h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} \cdot Q^2 (mcf) \quad (34)$$

donde,

- f : factor de fricción (adimensional)
- L : longitud de la tubería (m)
- D : diámetro de la tubería (m)
- Q : caudal (m^3/s)

La obtención del factor de fricción se realizará a través de la fórmula de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon_r}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (35)$$

donde,

- ϵ_r : rugosidad relativa
- Re : número de Reynolds

La utilización de la fórmula de Swamee-Jain está limitada al siguiente rango de utilización para la rugosidad relativa y el número de Reynolds:

- $10^{-6} < \epsilon_r < 10^{-2}$

- $5 \cdot 10^3 < Re < 10^8$

La rugosidad relativa se calcula con la Ecuación 36:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (36)$$

Para la obtención del número de Reynolds se ha de emplear la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (37)$$

donde ν , viscosidad cinemática, se calcula dividiendo la viscosidad dinámica, $2,052 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s), por la densidad, $1,029$ kg/m³.

Antes de calcular las pérdidas de carga, se va a comprobar que en el sistema diseñado se puede emplear la ecuación de Swamee-Jain para la obtención del factor de fricción. La rugosidad del material de las tuberías es polipropileno con una rugosidad de $0,007$ mm [25]. A continuación, se va a realizar el cálculo de la rugosidad relativa (Ecuación 36) y del número de Reynolds (Ecuación 37), ambos dependen del diámetro de la tubería por lo que se ha de calcular para los dos tamaños que conducto de los que va a constar el sistema:

- Diámetro 484 mm

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{484} = 1,45 \cdot 10^{-5}$$

$$Re = \frac{22,77 \cdot 0,484}{2,052 \cdot 10^{-5} / 1,029} = 5,5 \cdot 10^5$$

- Diámetro 686 mm

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{686} = 1,02 \cdot 10^{-5}$$

$$Re = \frac{22,67 \cdot 0,686}{2,052 \cdot 10^{-5} / 1,029} = 7,8 \cdot 10^5$$

La rugosidad relativa y el número de Reynolds se encuentran dentro del rango de utilización de la fórmula de Swamee-Jain. Por tanto, a continuación se va a calcular el factor de fricción para los dos diámetros sustituyendo en la Ecuación 35.

- Diámetro 484 mm

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1,45 \cdot 10^{-5}}{3,7} + \frac{5,74}{(5,5 \cdot 10^5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,013$$

- Diámetro 686 mm

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1,02 \cdot 10^{-5}}{3,7} + \frac{5,74}{(7,8 \cdot 10^5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,012$$

Las pérdidas de carga en cada tramo de conducto se van a calcular a continuación sustituyendo en la Ecuación 34.

- Tramo 1-3
 - Longitud: 12,85 m
 - Diámetro: 484 mm
 - Caudal: 4,19 m³/s
 - Factor de fricción: 0,013
 - $h_{f1-3} = 9,12$ mcaire = 9,39 mmcagua

- Tramo 2-3
 - Longitud: 13,11 m
 - Diámetro: 484 mm
 - Caudal: 4,19 m³/s
 - Factor de fricción: 0,013
 - $h_{f2-3} = 9,31$ mcaire = 9,58 mmcagua

- Tramo 3-4
 - Longitud: 4 m
 - Diámetro: 686 mm
 - Caudal: 8,38 m³/s

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

- Factor de fricción: 0,012
- $h_{f3-4} = 1,83 \text{ mcaire} = 1,89 \text{ mmcagu}$

- Tramo 5-6
 - Longitud: $2,45 + 2 + 3,72 = 8,17 \text{ m}$
 - Diámetro: 686 mm
 - Caudal: $8,38 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Factor de fricción: 0,012
 - $h_{f5-6} = 3,74 \text{ mcaire} = 3,85 \text{ mmcagua}$

- Tramo 7-8
 - Longitud: $2,25 + 2 + 5,24 + 1,14 = 10,63 \text{ m}$
 - Diámetro: 686 mm
 - Caudal: $8,38 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Factor de fricción: 0,012
 - $h_{f7-8} = 4,87 \text{ mcaire} = 5 \text{ mmcagua}$

- Tramo 9-10
 - Longitud: $2 + 5,24 + 4,2 = 11,44 \text{ m}$
 - Diámetro: 686 mm
 - Caudal: $8,38 \text{ m}^3/\text{s}$
 - Factor de fricción: 0,012
 - $h_{f9-10} = 5,24 \text{ mcaire} = 5,39 \text{ mcagua}$

Codos

Las pérdidas de carga de algunos elementos, como los codos, se pueden calcular a partir de la Ecuación 38.

$$h_m = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (38)$$

donde, k es el coeficiente de pérdidas característico de cada elemento. Para codos de 90° y radio medio el coeficiente k es 0,9 [27].

En la instalación se disponen dos tamaños de codo, en cada uno de los cuales se da una pérdida de carga diferente. A continuación, sustituyendo en la Ecuación 38 se calcula dicha pérdida de carga.

- Codo de 90°, D=484 mm, R=1,2 m:

$$h_m = 0,9 \cdot \frac{22,77^2}{2 \cdot 9,81} = 23,78 \text{ mcaire} \cdot 1,029 = 24,47 \text{ mmcagua}$$

- Codo de 90°, D=686 mm, R=1,715 m:

$$h_m = 0,9 \cdot \frac{22,67^2}{2 \cdot 9,81} = 23,57 \text{ mcaire} \cdot 1,029 = 24,25 \text{ mmcagua}$$

Válvula de mariposa

Las válvulas de mariposa que se van a instalar estarán siempre completamente abiertas o completamente cerradas. Cuando esté abierta la pérdida de carga es prácticamente nula y cuando está completamente cerrada impide el paso del gas a través del tramo 1-3 o 2-3.

Equipos de tratamiento de gas residual

Cada uno de los equipos de tratamiento de gas diseñados produce una pérdida de carga en la instalación la cual ha sido calculada anteriormente. A continuación se presentan dichas pérdidas de carga.

- Ciclón:

$$1885,38 \text{ Pa} \cdot \frac{10,33 \text{ mca}}{101337,3 \text{ Pa}} = 0,192 \text{ mca}$$

- Lavador Venturi:

$$(15,91 \text{ Pa} + 5 \text{ Pa}) \cdot \frac{10,33 \text{ mca}}{101337,3 \text{ Pa}} = 0,0081 \text{ mca}$$

- Torre de aspersión:

$$0,18 \text{ mca} + \left(4 \text{ Pa} \cdot \frac{10,33 \text{ mca}}{101337,3 \text{ Pa}} \right) = 0,18 \text{ mca}$$

9.1.4. Chimenea

Para comenzar con el diseño de la chimenea se va a determinar la altura de la misma, posteriormente el diámetro y por último se detallarán el material y las pérdidas de carga a lo largo de la chimenea.

Altura de la chimenea

La altura de la chimenea se va a calcular la altura de la chimenea según la Instrucción Técnica – 07 (IT-07): Altura de chimeneas. Esta instrucción técnica diferencia entre alta y baja carga másica. Baja carga másica es cuando ninguno de los siguientes contaminantes supera el límite de emisión indicado, solo se detallan los contaminantes que emite la chimenea en cuestión:

- Materia particulada: 0,25 kg/h
- Ácido clorhídrico: 0,25 kg/h

Debido a los rendimientos de depuración de los equipos instalados no se emitirá la cantidad de contaminante indicado. Por lo tanto, se puede considerar el sistema como de baja carga másica, con lo que la chimenea deberá tener una altura mínima de diez metros sobre el nivel del suelo y superar al menos tres metros la altura de la cumbrera [29]. Además, se recomienda que la altura de la chimenea sobre la cumbrera sea igual a la altura desde el suelo hasta la misma para evitar que los gases vuelvan al interior de la nave [26]. La altura de la nave dentro de la que se va a instalar la chimenea es igual a 11 m, por lo tanto, la altura de la chimenea ha de ser mínimo de 14 m y según el Manual de Ventilación Industrial debe ser de 22 m. Por lo tanto, para estar del lado de la seguridad, la altura de la chimenea será igual a 22 m.

Diámetro de la chimenea

Una vez conocida la altura de la chimenea se debe determinar el diámetro de la misma. Cuando los gases son expulsados por la boca de la chimenea requieren una velocidad mínima de salida que varía en función de la altura de la chimenea. Para sistemas de corriente forzada, sistemas con ventilador, se requieren las siguientes velocidades [30]:

- Altura de chimenea
 - $H \leq 20 \text{ m} \rightarrow v_s \geq 6 \text{ m/s}$
 - $20 \leq H \leq 40 \text{ m} \rightarrow v_s \geq 9 \text{ m/s}$
 - $H \geq 40 \text{ m} \rightarrow v_s \geq 12 \text{ m/s}$

Por lo tanto, para una chimenea de $H = 22$ m, la velocidad de salida ha de ser igual o superior a 9 m/s. Sustituyendo el caudal de gases y la velocidad, y despejando el diámetro de la Ecuación 2:

$$D = \sqrt{4 \cdot \frac{8,38}{\pi \cdot 9}} = 1,09 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

El diámetro de la chimenea será 1 m, con lo cual la velocidad de salida de los gases alcanzará 10,67 m/s, superior al mínimo exigido.

Material de la chimenea

La chimenea se va a construir en polipropileno homopolímero (PPH) en la parte interior, 15 mm de espesor, y para lograr resistencia mecánica se fretará en la parte exterior con poliéster, 5 mm.

Pérdidas de carga a lo largo de la chimenea

La principal pérdida de carga que se da en la chimenea es debida a la fricción. La pérdida de carga debida a la fricción se va a calcular a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach utilizada anteriormente, Ecuación 34. Para ello, previamente se ha de calcular el factor de fricción, f , Ecuación 35.

Sustituyendo en la Ecuación 36, se va a calcular la rugosidad relativa. Para estar del lado de la seguridad se va a tomar una rugosidad $\epsilon=0,1$ mm.

$$\epsilon_r = \frac{0,1}{1300} = 7,70 \cdot 10^{-5}$$

El número de Reynolds, Ecuación 37,

$$Re = \frac{10,67 \cdot 1}{2,052 \cdot 10^{-5} / 1,029} = 5,35 \cdot 10^5$$

Tanto el espesor relativo como el número de Reynolds se encuentran dentro de los límites para poder aplicar la ecuación de Swamee-Jain para el cálculo del factor de fricción. Sustituyendo en la Ecuación 35:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{7,7 \cdot 10^{-5}}{3,7} + \frac{5,74}{(5,35 \cdot 10^5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,014$$

Sustituyendo en la Ecuación 34 se obtienen las pérdidas de carga debido a la fricción a lo largo de la chimenea:

$$h_f = \frac{8 \cdot 0,014 \cdot 22}{\pi^2 \cdot 1^5 \cdot 9,81} \cdot 8,38^2 = 1,79 \text{ mcaire} = 1,83 \text{ mmcagua}$$

En la Tabla 25 se recogen los detalles de la instalación de aspiración: diámetros de tuberías, pérdidas por fricción y por accesorios y pérdidas totales en los tramos y en los equipos. Las características del ventilador instalado se detallan más adelante.

Tabla 25. Detalle de la instalación de aspiración.

TRAMO	EQUIPO LAVADO DE GASES	h_{equipo} (mmcagua)	Lreal (m)	Q (m ³ /s)	DN (mm)	D _{int} (mm)	MATERIAL	v (m/s)	h_f (mcaire)	h_f (mmcagua)	nº CAMPANAS	$h_{campana}$ (mmcagua)	nº CODOS 90º	D _{codo} (mm)	RADIO DE CURVATURA (mm)	k (codo 90º)	h_{codo} (mmcagua)	Σh_{tramo} (mmcagua)
1-3	-	-	12,85	4,19	500	484	PP	22,77	9,12	9,39	1	4,75	1	484	1200	0,9	24,47	38,61
2-3	-	-	13,11	4,19	500	484	PP	22,77	9,31	9,58	1	4,75	1	484	1200	0,9	24,47	38,8
3-4	-	-	4	8,38	710	686	PP	22,67	1,83	1,89	-	-	-	-	-	-	-	1,89
-	Ciclón	192	-	8,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	192
5-6	-	-	8,17	8,38	710	686	PP	22,67	3,74	3,85	-	-	2	686	1715	0,9	24,25	52,35
-	Lavador Venturi	8,1	-	8,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,1
7-8	-	-	10,63	8,38	710	686	PP	22,67	4,87	5	-	-	3	686	1715	0,9	24,25	77,75
-	Torre aspersion	180	-	8,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180
9-10	-	-	11,44	8,38	710	686	PP	22,67	5,24	5,39	-	-	3	686	1715	0,9	24,25	78,14
Chimenea	-	-	22	8,38	1000	1000	PPH	10,67	1,79	1,83	-	-	-	-	-	-	-	1,83

9.1.5. Ventilador

Para calcular la altura necesaria en el ventilador se va a aplicar Bernoulli al recorrido más desfavorable, en este caso, es indiferente aplicarlo desde el Reactor 1 o desde el Reactor 2 hasta la salida del ventilador porque ambos circuitos están equilibrados.

Para el análisis de presiones y pérdidas de carga en el sistema de conducciones se utiliza la Ecuación de Bernoulli generalizada, Ecuación 43 [27]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{Ventilador} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_{12} \quad (43)$$

donde,

- subíndices 1 y 2 hacen referencia a los puntos entre los que se desplaza el flujo.
- z: cota geométrica del fluido, representa la energía potencial del sistema (mcf).
- p/γ : altura de presión del fluido (mcf).
- $v^2/2g$: altura cinética del fluido (mcf).
- γ : peso específico del fluido (N/m^3).
- g: aceleración de la gravedad (m/s^2).
- $H_{Ventilador}$: energía de extracción del ventilador entre el punto inicial y final.
- Σh_{12} : pérdidas de energía entre el punto 1 y 2. Es suma de dos términos: $h_{f,12}$ (pérdidas de carga por fricción) y $h_{m,12}$ (pérdidas menores).

A continuación, se sustituye en la Ecuación 43:

$$\begin{aligned} z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + H_{Ventilador} \\ = z_{10} + \frac{p_{10}}{\gamma} + \frac{v_{10}^2}{2g} + h_{23} + h_{34} + h_{ciclón} + h_{56} + h_{Venturi} + h_{78} + h_{torre} + h_{910} \end{aligned}$$

Se considera que la cota geométrica es la misma a la entrada del reactor como a la salida del ventilador, $z_2=z_{10}$; la altura cinética en el reactor se considera despreciable, $v_2^2/(2 \cdot g)=0$; la presión a la entrada y a la salida se consideran iguales, $p_2=p_{10}$. La altura cinética se multiplica por 1,029 para convertirla en mmcagua. Por lo tanto, la ecuación anterior se reduce a:

$$H_{Ventilador} = 1,029 \cdot \frac{v_{10}^2}{2g} + h_{23} + h_{34} + h_{ciclón} + h_{56} + h_{Venturi} + h_{78} + h_{torre} + h_{910} + h_c$$

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

donde, la velocidad de salida del ventilador es la velocidad del fluido a través de la chimenea, 10,67 m/s. Sustituyendo los valores de las pérdidas totales por tramo y la velocidad de salida:

$$H_{\text{Ventilador}} = 1,029 \cdot \frac{10,67^2}{2 \cdot 9,81} + 38,8 + 1,89 + 192 + 52,35 + 8,1 + 77,75 + 180 + 78,14 + 1,83 = 636,83 \text{ mmcagua}$$

Con todo ello, $H_v = 636,83$ mmcagua para un caudal de $8,38 \text{ m}^3/\text{s}$.

Conocida la altura y el caudal que ha de impulsar el ventilador se procede a seleccionar el modelo que se ha de instalar. El modelo escogido corresponde al Catálogo de Aplicaciones Industriales de S&P Sistemas de Ventilación, S.L.U. Se trata de un ventilador centrífugo de alta presión con rodete de álabes curvados, el modelo es CRNT-TR/1251. En la Figura 31 se representa la curva de características de dicho modelo.

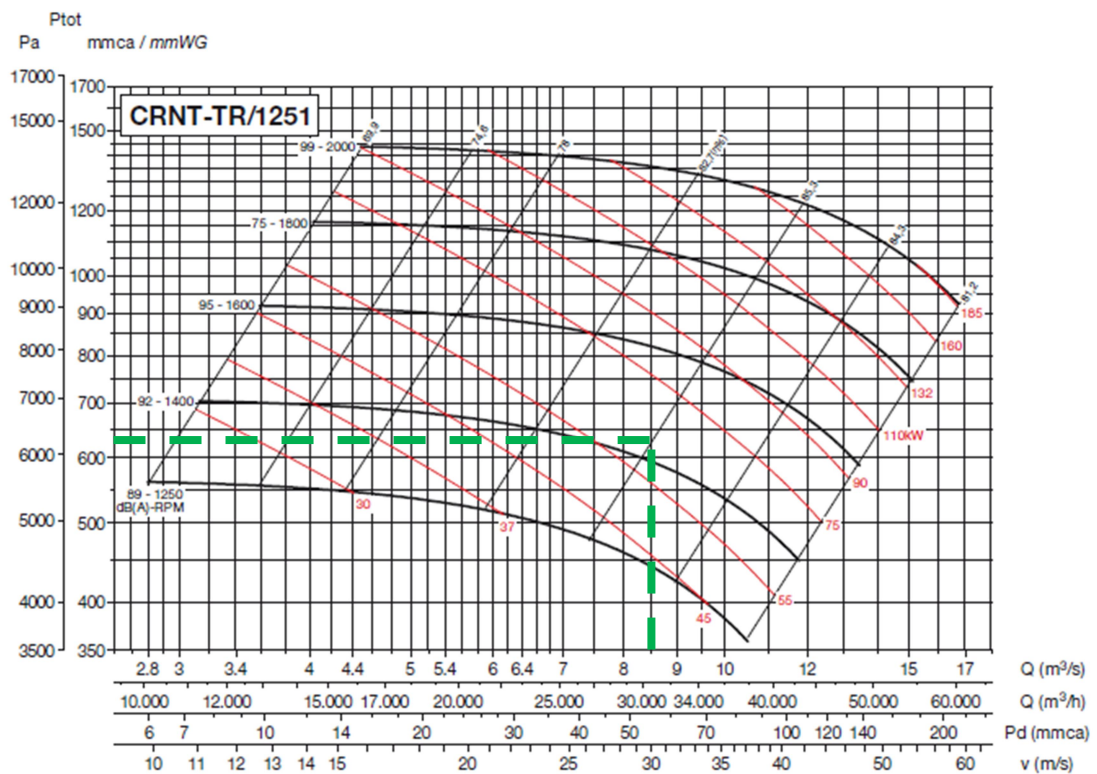


Figura 31. Curva característica del ventilador CRNT-TR/1251. [31]

Se ha optado por un modelo con orientación de descarga de 315° , con el objetivo de minimizar las pérdidas en la unión a la chimenea y permitir un diseño de unión que evite la entrada de agua al interior del ventilador.

En el punto de funcionamiento de la instalación, $Q=30200 \text{ m}^3/\text{h}$ y $P_{\text{tot}}=637 \text{ mmca}$, el ventilador presenta las siguientes características técnicas:

- Revoluciones: 1600 rpm
- Potencia instalada: 75 kW
- Rendimiento, η : 82,7 %
- Velocidad de salida del aire: 30 m/s
- Presión dinámica, P_d : 57,5 mmca
- Presión estática ($P_{\text{tot}}-P_d=637-57,5$): 579,5 mmca
- Nivel sonoro: 95 dB(A)

El modelo que se va a instalar presenta una orientación de descarga de 315° , con el objetivo de minimizar las pérdidas en la unión a la chimenea y permitir un diseño de unión que evite la entrada de agua al interior del ventilador.

9.2. CONDUCCIONES DE AGUA

Las conducciones de agua se instalarán de polipropileno. Al igual que para las conducciones de aire, el proveedor elegido para el suministro de las mismas es AIQSA. En la Figura 32 se presentan los tamaños de tubería de presión disponibles. PN hace referencia a la presión nominal máxima en bares que pueden soportar sin sufrir daños. Para la instalación presente se instalarán tuberías con PN6.

Para calcular el diámetro necesario de las tuberías se tomará como velocidad máxima permisible en tubería 2 m/s [27]. Se toma este valor máximo con el objetivo de disminuir la erosión en el interior de las tuberías y minimizar las pérdidas de carga debidas a la fricción.

Tubería de presión en Polipropileno Homopolímero								
Diámetro Exterior mm	PN2.5 SDR 41		PN4 SDR 26		PN8 SDR 17.8		PN10 SDR 11	
	e mm	Precio €/m	e mm	Precio €/m	e mm	Precio €/m	e mm	Precio €/m
10							1,8	0,47
12							1,8	0,58
16							2,2*	0,97
20					1,8	0,95	1,9	1,09
25					1,8	1,34	2,3	1,67
32					1,8	1,74	2,9	2,64
40			1,8	2,20	2,3	2,77	3,7	4,19
50	1,8	2,78	2,0	3,06	2,9	4,29	4,6	6,48
63	1,8	3,55	2,5	4,82	3,6	6,69	5,8	10,26
75	1,9	4,45	2,9	6,57	4,3	9,50	6,8	14,22
90	2,2	6,26	3,5	9,51	5,1	13,51	8,2	20,62
110	2,7	9,17	4,2	13,92	6,3	20,22	10,0	30,58
125	3,1	11,99	4,8	17,88	7,1	25,90	11,4	39,72
140	3,5	15,03	5,4	22,65	8,0	32,51	12,7	49,47
160	4,0	19,40	6,2	29,66	9,1	42,36	14,6	64,91
180	4,4	24,18	6,9	36,88	10,2	53,33	16,4	81,98
200	4,9	29,66	7,7	45,71	11,4	66,03	18,2	101,08
225	5,5	37,59	8,6	57,40	12,8	83,20	20,5	128,00
250	6,2	47,03	9,6	71,01	14,2	102,60	22,7	157,46
280	6,9	58,21	10,7	88,58	15,9	128,00	25,4	197,08
315	7,7	73,14	12,1	112,76	17,9	162,54	28,6	249,90
355	8,7	92,85	13,6	142,22	20,1	206,22	32,3	316,95
400	9,8	117,84	15,3	180,83	22,7	261,08	36,4	402,29
450	11,0	155,39	17,2	237,84	25,5	343,54	40,9	529,59
500	12,3	192,38	19,1	292,80	28,3	424,94	45,4	653,26
560	13,7	238,89	21,4	366,80	31,7	531,70	51,0	consultar
630	15,4	302,32	24,1	465,10	35,7	673,34	57,3	consultar
710	17,4	384,77	27,2	590,89	40,2	854,10		
800	19,6	487,30	30,6	748,40	45,3	1.084,54		* PN16

La longitud de los tubos es de 5 metros. Color gris RAL 7032.
Dimensiones según DIN 8077/8078 DIN EN ISO 15494C.
Rango de temperatura: 0°C ↔ +100°C. Densidad 0,91.
Bajo peso. Muy resistente a ácidos, bases y disolventes.
Excelentes propiedades en aislamiento eléctrico. Mal conductor.
Fisiológicamente sin inconvenientes, reciclable.




Figura 32. Diámetros disponibles de tubería de presión en polipropileno. [25]

9.2.1. Lavador Venturi

El diseño de las conducciones y de los equipos auxiliares se va a comenzar en el lavador Venturi. Para el funcionamiento adecuado del equipo y el abastecimiento de agua de lavado al proceso productivo se requieren las siguientes tuberías y equipos auxiliares:

- Dos tuberías para recircular el agua de lavado desde el depósito hasta la garganta del Venturi, las cuales serán simétricas. Cada tubería constará de dos bombas, una en funcionamiento y otra de reserva. A la salida de cada bomba se colocará una válvula anti retorno y una válvula de bola manual. En la toma de agua desde la torre hasta las bombas se colocará una válvula de bola manual. No es necesaria la instalación de filtros pues la toma de agua se colocará a 0,5 m sobre el nivel del suelo, por lo tanto no se absorberán las partículas decantadas en el fondo del depósito.

- Una tubería para conducir el agua de lavado hacia el Reactor 1. Se instalarán dos bombas, una activa y una de reserva. En la tubería de toma de agua de las bombas se instalará una válvula de bola manual. En la tubería de salida de las dos bombas se instalará una válvula de bola manual y una válvula anti retorno.
- Una tubería para conducir el agua de lavado hacia el Reactor 2. Se instalarán dos bombas, una activa y una de reserva. En la tubería de toma de agua de las bombas se instalará una válvula de bola manual. En la tubería de salida de las dos bombas se instalará una válvula de bola manual y una válvula anti retorno.
- Una tubería de purgado con una electroválvula.
- Una tubería de llenado de agua de red con una electroválvula.
- Una tubería de llenado de agua desde la torre de aspersión. El diseño de la misma se realizará cuando se diseñen los equipos de la torre de aspersión, debido a que esta tubería se instalará cuando se instale, en caso de ser necesario, la torre de aspersión.

El objetivo de instalar dos bombas para cada requerimiento es no afectar al abastecimiento en caso de ser necesario el mantenimiento en una de las bombas. Para realizar el cambio de una bomba a otra se han colocado las válvulas de bola manual, para realizar el cambio manualmente. Además, se ha añadido una válvula anti retorno en la salida de impulsión de cada bomba para evitar la entrada de agua a la bomba en caso de no estar en funcionamiento.

Tramo A y B: Tuberías de recirculación del depósito a la garganta del Venturi

El caudal que circulará por cada una de las tuberías es la mitad del caudal de lavado necesario en la garganta, es decir, $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Conociendo el caudal y estableciendo la velocidad máxima de 2 m/s se puede calcular el diámetro de tubería, para ello se despejará el diámetro de la Ecuación 2:

$$D_{A,B} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 2}} = 0,076 \text{ m} = 76 \text{ mm}$$

De la Figura 31 se escogerá el diámetro comercial inmediatamente superior, $D=90 \text{ mm}$, cuyo diámetro interior es igual a 83 mm ($D_{\text{int}}=D-2 \cdot e$). Con este diámetro se obtiene una velocidad en la tubería,

$$v_{A,B} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \frac{(83 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 1,66 \text{ m/s}$$

Para poder escoger la bomba adecuada para este punto de la instalación es necesario conocer las pérdidas en el tramo de tubería. Las primeras pérdidas que se van a calcular son las debidas

a la fricción, para ello se calculará la rugosidad relativa, el número de Reynolds, el factor de fricción y con estos datos las pérdidas.

Sustituyendo en la Ecuación 36 se obtiene la rugosidad relativa, ya se había utilizado anteriormente la rugosidad del polipropileno, $\varepsilon=0,007$ mm.

$$\varepsilon_r = \frac{0,007}{83} = 8,4 \cdot 10^{-5}$$

A partir de la Ecuación 37 se calculará el número de Reynolds. Para obtener la viscosidad cinemática se tomarán la viscosidad dinámica y la densidad del agua a 20°C y 1 atm.

$$Re = \frac{1,66 \cdot 83 \cdot 10^{-3}}{0,001003/1000} = 1,37 \cdot 10^5$$

Debido a que los valores de la rugosidad relativa y del número de Reynolds se encuentran dentro del rango de utilización de la ecuación de Swamee-Jain, se empleará la Ecuación 35 para obtener el factor de fricción.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{8,4 \cdot 10^{-5}}{3,7} + \frac{5,74}{(1,37 \cdot 10^5)^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,017$$

La longitud de la tubería desde la bomba es 3,91 m y la tubería de aspiración mide 0,50 m, por tanto la longitud total es igual a 4,41 m, por lo que una vez conocido el factor de fricción y la longitud total se sustituye en la Ecuación 34 para estimar las pérdidas de carga debidas a la fricción.

$$h_f = \frac{8 \cdot 0,017 \cdot 4,41}{\pi^2 \cdot (83 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot (9 \cdot 10^{-3})^2 = 0,127 \text{ mcagua}$$

En el tramo de estudio se han de colocar dos codos de 90°, una válvula antirretorno, una te estándar que conecte las dos bombas con la tubería que sube hacia la garganta y una válvula de bola. Así mismo, en la tubería de aspiración de la bomba se colocará una válvula de bola manual. Las pérdidas menores ocasionadas en estos elementos se pueden calcular a partir de la Ecuación 38 y de un coeficiente de pérdidas, k, característico de cada elemento. El valor de k para un codo de 90° y un radio de curvatura igual al diámetro del mismo es 0,9; en una válvula antirretorno de clapeta, k es aproximadamente 2,5; en una válvula de bola k tiene un valor de 0,2; y para una te estándar el valor de k es igual a 1,8 [27]. Por lo tanto, sustituyendo en la

Ecuación 38 el valor de k y la velocidad, 1,66 m/s en todos los elementos, se obtiene la pérdida menor en cada uno de estos accesorios.

Codo 90°:

$$h_{m,codo} = 0,9 \cdot \frac{1,66^2}{2 \cdot 9,81} = 0,126 \text{ mcagua}$$

Válvula antirretorno:

$$h_{m,válvula \text{ antirretorno}} = 2,5 \cdot \frac{1,66^2}{2 \cdot 9,81} = 0,351 \text{ mcagua}$$

Válvula de bola:

$$h_{m,válvula \text{ de bola}} = 0,2 \cdot \frac{1,66^2}{2 \cdot 9,81} = 0,028 \text{ mcagua}$$

Te:

$$h_{m,te} = 1,8 \cdot \frac{1,66^2}{2 \cdot 9,81} = 0,253 \text{ mcagua}$$

El total de las pérdidas, de fricción más las menores es:

$$\Sigma h_{A,B} = 0,127 + 3 \cdot 0,126 + 0,351 + 0,028 + 0,253 = 1,137 \text{ mcagua}$$

Para obtener la altura necesaria que ha de aportar la bomba es necesario aplicar la Ecuación de Bernouilli al sistema, Ecuación 43. Se considera que el depósito no está presurizado y la garganta del Venturi tampoco, por lo tanto, la altura de presión del fluido se puede eliminar de la igualdad. Por otra parte, la velocidad de aspiración y la de descarga es constante, por lo cual el término cinético también puede obviarse.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{bomba} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_{12} \rightarrow 0,5 + H_{bomba} = 3,506 + 1,137$$
$$\rightarrow H_{bomba} = 4,14 \text{ mcagua}$$

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

La altura de la bomba obtenida es 4,14 mcagua que equivalen a 0,414 bares, la bomba ha de proporcionar esa altura más la presión de salida del agua en la gargante. El caudal que ha de suministrar la bomba es 32,4 m³/h. La bomba seleccionada pertenece al catálogo de Bombas Ideal, modelo RFXA, se trata de una electrobomba monoblock con el rodete de acero inoxidable, apto para aguas agresivas y para una temperatura de hasta 90 °C. En la Figura 33 se muestran las prestaciones y características de la bomba. Se ha remarcado en amarillo el tipo de bomba seleccionada en función del caudal y de la presión, RFXA 40-16/5,5. El caudal elegido es 36 m³/h, levemente superior al necesario, y la presión suministrada por la bomba 2,9 bares, por lo que la presión de salida del agua en la garganta será igual a 2,4 bares. Las bombas se instalarán con un variador de frecuencia que permita regular el caudal y la presión.

Tipo	Código	Motor P2		l/min m ³ /h	0	100	200	300	333	400	500	600	700	1000	1200	
		KW	HP		0	6	12	18	20	24	30	36	42	60	72	
RFXA 32-12/1,5	P0042575	1,1	1,5	m.c.a.	22	21	18,4	14,1	12							
RFXA 32-16/2	P0042576	1,5	2		29	28	24,5	19,2	17							
RFXA 32-16/3	P0042577	2,2	3		37	35,5	32	27	25							
RFXA 32-20/4	P0042578	3	4		44	42	37,5	31	28							
RFXA 32-20/5,5	P0042579	4	5,5		55	53,5	49,5	43,5	40,5							
RFXA 32-20/7,5	P0042580	5,5	7,5		70	69	65	58,3								
RFXA 32-20/10	P0042581	7,5	10		70	69	65	58,3	55,5	49						
RFXA 40-12/2	P0042582	1,5	2		20		19	17,6	17	15,7	13,2	10,3	7			
RFXA 40-12/3	P0042583	2,2	3		26		25,5	24	23,5	22	19,5	16,4	13			
RFXA 40-16/4	P0042584	3	4		31		29,5	27,5	27	25,5	22,5	20	17			
RFXA 40-16/5,5	P0042349	4	5,5		40		38,5	37	36	34,5	32	29	25,5			
RFXA 40-20/7,5	P0042350	5,5	7,5		47		45,5	44	43	41	38	35	31			
RFXA 40-20/10	P0042585	7,5	10		58		57	55,5	55	53,5	51	47,5	44			
RFXA 40-20/15	P0042586	11	15		72		71	70	70	68,5	66	63	59			
RFXA 50-12/3	P0042587	2,2	3		19					17,5	16,3	14,9	13,4	8		
RFXA 50-12/4	P0042588	3	4		22					20,5	19,6	18,4	17	11,8	8	
RFXA 50-12/5,5	P0042589	4	5,5		27					26	25	24	22,5	17,9	14	
RFXA 50-16/7,5	P0042351	5,5	7,5		33					31	30	28,5	27	22	18	
RFXA 50-16/10	P0042590	7,5	10		40					38,5	37,5	36	35	30	26	
RFXA 50-20/12,5	P0042591	9,2	12,5		53					50	49	47,5	40,5	34		
RFXA 50-20/15	P0042592	11	15	58					56	55	54	48	42			
RFXA 50-20/20	P0042593	15	20	72					70	69	68	62	57			

Tipo	Código	Motor P2		l/min m ³ /h	0	600	700	1000	1200	1700	1900	2100	2200	2300	
		KW	HP		0	36	42	60	72	102	114	126	132	132	
RFXA 65-12/5,5	P0042594	4	5,5	m.c.a.	22	20	19,4	16,5	14,4	8,6	6,3				
RFXA 65-12/7,5	P0042595	5,5	7,5		27	25	24,5	21,5	19,1	13,3	10,8	8			
RFXA 65-12/10	P0042596	7,5	10		32	30,5	29,5	27	24,7	18,7	16,1	13,4	12		
RFXA 65-16/10	P0042597	7,5	10		32		30	27	25,9	19,9	17,1	14,2			
RFXA 65-16/12,5	P0042598	9,2	12,5		36,5		34,5	32	29,9	23,9	21,1	18,3	16,8		
RFXA 65-16/15	P0042599	11	15		40,5		38,5	36	34,2	28,4	25,8	23	21,5	20	
RFXA 65-16/20	P0042600	15	20		48		45,5	43	41	35,3	32,6	29,6	28	26,5	
RFXA 65-20/20	P0042601	15	20		54		51	48	45,5	38,4	35,3	31,8	30	28	
RFXA 65-20/25	P0042602	18,5	25		60,5		58,5	55,5	53	46	43	39,7	38	36,3	
RFXA 65-20/30	P0042603	22	30		67		65,5	63	60,5	54	51	48	46,5	45	

Figura 33. Prestaciones y características electrobomba RFXA. [32]

Tramo C: Tubería de conducción del agua de lavado al Reactor 1

El caudal que se ha de transportar por la tubería hasta el reactor oscila entre 500 y 1000 l/h. Para realizar los cálculos se tomará el mayor caudal, 1000 l/h es decir $2,78 \cdot 10^{-4}$ m³/s. Al igual que en los cálculos anteriores la velocidad máxima será igual a 2 m/s. Por tanto, sustituyendo en la Ecuación 2:

$$D_C = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 2}} = 0,013 \text{ m}$$

Se tomará el diámetro comercial disponible inmediatamente superior al obtenido, Figura 30, 20 mm, cuyo diámetro interior es 16,4 mm. La velocidad real en el tramo será:

$$v_C = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot \frac{(16,4 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 1,32 \text{ m/s}$$

Los parámetros necesarios para obtener la pérdida de presión debida a la fricción son los siguientes:

- Rugosidad relativa, Ecuación 36: $\epsilon_r = 4,27 \cdot 10^{-4}$
- Número de Reynolds, Ecuación 37: $Re = 2,16 \cdot 10^5$
- Factor de fricción, Ecuación 35: $f_c = 0,018$
- Longitud del tramo: $L_C = 13,6 + 0,5 = 14,1 \text{ m}$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 34 se obtienen las pérdidas debidas a la fricción en el tramo C:

$$h_f = \frac{8 \cdot 0,018 \cdot 14,1}{\pi^2 \cdot (16,4 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot (2,78 \cdot 10^{-4})^2 = 1,37 \text{ mcagua}$$

En el tramo C se han de colocar los siguientes accesorios: dos codos de 90°, una te, dos válvulas de bola y una válvula antirretorno. Las pérdidas se calcularán a partir de la Ecuación 38, los valores de k son iguales a los utilizados con los accesorios en el tramo A:

- $h_{m,codo} = 0,08 \text{ mcagua}$
- $h_{m,antirretorno} = 0,22 \text{ mcagua}$
- $h_{m,válvula \text{ bola}} = 0,018 \text{ mcagua}$
- $h_{m,TE} = 0,16 \text{ mcagua}$

El total de las pérdidas en el Tramo C es:

$$\Sigma h_C = 1,37 + 2 \cdot 0,08 + 0,22 + 2 \cdot 0,018 + 0,16 = 1,95 \text{ mcagua}$$

Para conocer la altura necesaria de la bomba se aplica la Ecuación de Bernouilli, Ecuación 43.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{bomba} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_{12} \rightarrow 0,5 + H_{bomba} = 2,8 + 1,95$$

$$\rightarrow H_{bomba} = 4,25 \text{ mcagua}$$

La bomba a seleccionar ha de proporcionar la altura calculada, 0,425 bares, más la presión de salida del agua en el reactor, la presión del agua en el reactor no es significativa. Se va a elegir el mismo tipo de bomba que para la recirculación del líquido de lavado en la garganta. En este caso el caudal a bombear es inferior, 1 m³/h. Por lo tanto, en la Figura 33 en la cual se muestran las prestaciones y características de la bomba, se ha elegido el modelo RFXA 32-12/1,5. Este modelo suministra un caudal 6 m³/h y una presión máxima de 2,1 bares. Las bombas se instalarán con un variador de frecuencia que permita regular el caudal de acuerdo a los requerimientos en el reactor.

Tramo D: Tubería de conducción del agua de lavado al Reactor 2

Por el Tramo D se ha de conducir la misma cantidad de agua que en el Tramo C, 2,78·10⁻⁴ m³/s, por lo que el diámetro de la tubería de este tramo es 20 mm, con diámetro interior 16,4 mm, y la velocidad del fluido es 1,32 m/s. La diferencia de esta conducción con la conducción hasta el Reactor 1, es el camino que ha de recorrer la tubería y por tanto las pérdidas debidas a la fricción y a los accesorios. Para poder unir el depósito con el Reactor 2 son necesarios los siguientes accesorios: cuatro codos de 90°, una te, dos válvulas de bola y una válvula antirretorno. Además, la longitud de la tubería en este tramo es bastante superior a la del Tramo C, el tramo mide 26,2 m. A continuación, se calculan todas las pérdidas de carga del tramo para poder calcular la altura de la bomba.

El factor de fricción del tramo es el mismo que en el tramo C, pues tienen el mismo diámetro interior, transportan el mismo caudal y por tanto la velocidad es igual, 0,018. Las pérdidas debidas a la fricción se calculan sustituyendo en la Ecuación 34 para una longitud total de 25,7 m:

$$h_f = \frac{8 \cdot 0,018 \cdot 26,2}{\pi^2 \cdot (16,4 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot (2,78 \cdot 10^{-4})^2 = 2,54 \text{ mcagua}$$

Las pérdidas individuales de cada accesorio son las mismas que para los accesorios del tramo C. Por tanto, el total de las pérdidas en el tramo D es:

$$\Sigma h_D = 2,54 + 4 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,22 + 0,018 + 0,16 = 3,48 \text{ mcagua}$$

Para conocer la altura necesaria de la bomba se aplica la Ecuación de Bernouilli, Ecuación 43.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{bomba} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h_{12} \rightarrow 0,5 + H_{bomba} = 2,8 + 3,48$$
$$\rightarrow H_{bomba} = 5,78 \text{ mcagua}$$

Para el abastecimiento de agua de lavado en el Reactor 2 se va a optar por la misma bomba que para el abastecimiento en el Reactor 1, debido a que los requerimientos son muy similares en ambas líneas. El modelo es RFXA 32-12/1,5. Estas bombas también se instalarán con un variador de frecuencia que permita regular el caudal suministrado.

Tramo E: Tubería de purgado

Se instalará una tubería de purga en la parte inferior del depósito, a una altura de 0,10 m, con el fin de poder extraer el agua del depósito en caso de que fuera necesario. La tubería constará de una válvula con actuador neumático que será activada por unos sensores de ph y conductividad. Con el fin de unificar lo máximo posible el tamaño de tuberías se instalará un diámetro de tubería de 20 mm, con diámetro interior de 16,4 mm. La válvula que se va a instalar es una válvula de esfera y eje de inoxidable con actuador neumático para unirse mediante bridas, el diámetro seleccionado es DN20 [33]. El agua purgada se almacenará en un depósito auxiliar, cuyo diseño no es de aplicación para este trabajo.

Tramo F: Tubería de llenado de agua de red

La entrada de agua de red al depósito se colocará a 1 m sobre el nivel del suelo, por encima del nivel del agua en el interior del mismo. Se instalará una tubería desde el depósito hasta la toma de agua de red más cercana. Para automatizar el llenado de agua se instalará una válvula con actuador neumático en la tubería, igual a la de la tubería de purgado, que permitirá la entrada de agua cuando el nivel del líquido dentro de la torre alcance un nivel mínimo predeterminado. El diámetro de tubería que se instalará será 20 mm, con diámetro interior igual a 16,4 mm. La tubería tendrá una longitud de 1,4 m.

9.2.2. Torre de aspersión

Para la recirculación del agua en el interior de la torre de aspersión y el llenado de la misma son necesarios las siguientes tuberías y equipos auxiliares:

- Dos tuberías para recircular el agua de lavado desde el inferior de la torre hasta los difusores, se requieren dos tuberías, una para cada nivel de difusores, debido al elevado caudal de agua y a la presión de 3 bares necesaria en cada boquilla. Cada tubería constará de dos bombas, una en funcionamiento y otra de reserva al igual que en el lavador Venturi. A la salida de cada bomba se colocará una válvula anti retorno y una válvula de bola manual. En la toma de agua desde la torre hasta las bombas se colocará una válvula de bola manual.
- Una tubería de purgado del agua de lavado en la que se instalará una válvula con actuador neumático con el fin de automatizar la purga.

- Una tubería de llenado de agua de red, también contará con una válvula con actuador neumático.
- Una tubería de trasiego de agua desde la torre de aspersión hasta el lavador Venturi, con el objetivo de llenar el depósito del lavador con el agua de la torre. Esta instalación constará de dos bombas, una en funcionamiento y una de reserva, que impulsen el agua del inferior de la torre hasta el depósito del Venturi. Será necesaria la colocación de dos válvulas de bola manuales y una válvula antirretorno.

Tramo G: Tubería de recirculación del inferior de la torre al nivel superior de pulverizadores

El caudal de agua que se ha de recircular de forma continua a cada uno de los niveles de pulverizadores es $0,013 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, $46,8 \text{ m}^3/\text{h}$. A diferencia de las tuberías diseñadas anteriormente para el lavador Venturi, en esta es necesaria una presión en el punto final de 3 bares. Para obtener el diámetro de la conducción se tomará como velocidad máxima 2 m/s . A continuación se calcula el diámetro a partir de la Ecuación 2:

$$D_G = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,013}{\pi \cdot 2}} = 0,091 \text{ m}$$

El diámetro comercial inmediatamente superior es 110 mm , diámetro interior $97,4 \text{ mm}$, Figura 30. La velocidad real en el tramo será:

$$v_G = \frac{0,013}{\pi \cdot \frac{(97,4 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 1,74 \text{ m/s}$$

Una vez conocidos el diámetro y la velocidad se puede calcular las pérdidas de carga debidas a la fricción:

- Rugosidad relativa, Ecuación 36: $\epsilon_r = 7,18 \cdot 10^{-5}$
- Número de Reynolds, Ecuación 37: $Re = 1,69 \cdot 10^5$
- Factor de fricción, Ecuación 35: $f_G = 0,017$
- Longitud del tramo: $L_G = 7,56 + 0,5 = 8,06 \text{ m}$

Pérdidas debidas a la fricción, Ecuación 34:

$$h_{f,G} = \frac{8 \cdot 0,017 \cdot 8,06}{\pi^2 \cdot (97,4 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot 0,013^2 = 0,22 \text{ mcagua}$$

A lo largo de la tubería son necesarios los siguientes elementos: dos codos de 90°, una te, una válvula antirretorno en la tubería de impulsión de la bomba, una válvula de bola y una reducción para adaptarse al diámetro de la tubería de los difusores, 50 mm. Las pérdidas de los accesorios se calcularán a partir de la Ecuación 38.

- $h_{m,codo}=0,14$ mcagua
- $h_{m,antirretorno}=0,39$ mcagua
- $h_{m,válvula\ bola}=0,031$ mcagua
- $h_{m,TE}=0,28$ mcagua

Reducción de $D=110$ a $d=50$, el coeficiente de pérdidas para este tipo de reducciones se estima en 9,5 [27]:

$$h_{m,reducción} = 3,5 \cdot \frac{1,74^2}{2 \cdot 9,81} = 0,54 \text{ mcagua}$$

El total de las pérdidas menores en el Tramo G es:

$$\Sigma h_{m,G} = 2 \cdot 0,14 + 0,39 + 2 \cdot 0,031 + 0,28 + 0,54 = 1,55 \text{ mcagua}$$

En este tramo se ha de tener en cuenta también las pérdidas de carga debidas a la fricción en la tubería de los pulverizadores, cuyo diámetro es 50 mm, con diámetro interior 40,8 mm. El material de la tubería es polipropileno. Para calcular las pérdidas de fricción se ha de conocer la velocidad a través de la tubería, Ecuación 2:

$$v_{dif} = \frac{0,013}{\pi \cdot \frac{(40,8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 9,94 \text{ m/s}$$

Parámetros para pérdidas de fricción en la tubería de los pulverizadores:

- Rugosidad relativa, Ecuación 36: $\epsilon_r=1,72 \cdot 10^{-4}$
- Número de Reynolds, Ecuación 37: $Re=4 \cdot 10^5$
- Factor de fricción, Ecuación 35: $f_G=0,016$

Para calcular las pérdidas debidas a la fricción se tomará una longitud igual a 3 m, que es el diámetro de la torre de aspersión, para estar del lado de la seguridad, debido a que es la máxima longitud que deberá recorrer el agua hasta llegar al pulverizador más alejado. Sustituyendo en la Ecuación 34:

$$h_{f,pul} = \frac{8 \cdot 0,016 \cdot 3}{\pi^2 \cdot (40,8 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot 0,013^2 = 5,93 \text{ mcagua}$$

El agua al pasar de la tubería a los pulverizadores también es sometida a una reducción de 40,8 mm a ½". Las pérdidas debidas a esta reducción son las siguientes, Ecuación 38:

$$h_{reducción,pul} = 3,5 \cdot \frac{9,94^2}{2 \cdot 9,81} = 17,63 \text{ mcagua}$$

Una vez calculadas todas las pérdidas entre la bomba y la salida de los pulverizadores, se puede realizar el sumatorio de las mismas para posteriormente sustituir en la ecuación de Bernoulli y obtener la altura de bomba necesaria.

$$\Sigma h_G = h_{f,G} + h_{m,G} + h_{f,pul} + h_{reducción,pul} = 0,22 + 1,55 + 5,93 + 17,63 = 25,33 \text{ mcagua}$$

Obtenidas las pérdidas totales se puede sustituir en la ecuación de Bernoulli para calcular la altura de bomba necesaria, Ecuación 43:

$$0,50 + H_{Bomba} = 6,66 + \frac{3 \cdot 10^5}{9810} + 25,33 \rightarrow H_{Bomba} = 62,07 \text{ mcagua}$$

La altura total que ha de proporcionar la bomba, ya se ha tenido en cuenta que a la salida de los difusores ha de haber 3 bares, $3 \cdot 10^5$ Pa, es igual a 6,2 bares. Dentro del modelo elegido para las anteriores aplicaciones, modelo RFXA de Bombas Ideal [32], se ha de escoger una bomba que suministre un caudal igual o superior a 46,8 m³/h a una altura igual o superior a 6,2 bares. La bomba escogida es RFXA 65-20/30, caudal máximo: 60 m³/h y presión: 6,3 bares. Al igual que el resto de bombas se instalarán con un variador de velocidad.

Tramo H: Tubería de recirculación del inferior de la torre al nivel inferior de pulverizadores

Las características de esta tubería son idénticas a las del Tramo G a excepción de la altura del nivel, por lo que variará el valor de las pérdidas de fricción hasta la tubería de los pulverizadores y la cota geométrica. Las características del tramo son las siguientes:

- $D_G = D_H = 110$ mm, $D_{int,G} = D_{int,H} = 97,4$ mm
- $v_G = v_H = 1,74$ m/s
- $L_H = 7,24 + 0,5 = 7,74$ m
- $f_G = f_H = 0,017$

Las pérdidas debidas a la fricción se van a calcular a partir de la Ecuación 34:

$$h_{f,H} = \frac{8 \cdot 0,017 \cdot 7,74}{\pi^2 \cdot (97,4 \cdot 10^{-3})^5 \cdot 9,81} \cdot 0,013^2 = 0,21 \text{ mcagua}$$

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes ubicada en Sarrión (Teruel)

- $\Sigma h_{m,G} = \Sigma h_{m,F} = 1,55$ mcagua
- $h_{f,dif} = 5,93$ mcagua
- $h_{reducción,dif} = 17,63$ mcagua

El sumatorio de las pérdidas totales en el Tramo H es:

$$\Sigma h = 0,21 + 1,55 + 5,93 + 17,63 = 25,32 \text{ mcagua}$$

Sustituyendo en la Ecuación 43 y despejando el valor de la altura de la bomba se obtiene la altura de bomba necesaria para el Tramo H:

$$0,50 + H_{Bomba} = 6,34 + \frac{3 \cdot 10^5}{9810} + 25,32 \rightarrow H_{Bomba} = 61,75 \text{ mcagua}$$

La altura necesaria en el Tramo H es aproximadamente igual a la altura necesaria en el Tramo G, por lo tanto, se instalará la misma bomba para ambos tramos pues requieren el mismo caudal y la misma presión. El modelo es RFXA 65-20/30.

Tramo I: Tubería de purgado

La tubería de purgado de la torre de aspersión tendrá las mismas características que la tubería de purgado del lavador Venturi. La conexión con la torre estará a una altura de 0,10 m, el diámetro de la tubería será 20 mm, con diámetro interior de 16,4 mm, y se instalará una válvula de esfera con actuador neumático.

Tramo J: Tubería de llenado de agua de red

Al igual que la tubería de purgado, la tubería de llenado de agua de red será similar a la del Venturi. Altura de conexión a la torre de 1 m, una válvula con actuador neumático que permita el llenado automático, diámetro de tubería igual a 20 mm, con 16,4 mm de diámetro interior, y una longitud de 1 m.

Tramo K: Tubería de trasiego de agua desde la torre de aspersión hasta el lavador Venturi

Se colocará una tubería que permita llenar el depósito del Venturi a partir del agua de la torre de aspersión, para ello será necesaria la instalación de bombas de impulsión. El caudal de trasiego no está determinado, por ello, se instalará una tubería de 50 mm, con diámetro interior 40,8 mm. La velocidad de diseño será 1,5 m/s, inferior al máximo de 2 m/s. El caudal de trasiego se obtiene a partir de la Ecuación 2:

$$Q_K = 1,5 \cdot \pi \cdot \frac{(40,8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Los parámetros necesarios para calcular las pérdidas de fricción son:

- $\varepsilon_r = 1,7 \cdot 10^{-4}$
- $Re = 6,1 \cdot 10^4$
- $f_K = 0,024$
- $L_K = 9,5 + 0,5 = 10 \text{ m}$

Las pérdidas debidas a la fricción son 0,67 mcagua. Los accesorios necesarios en el Tramo G son: un codo de 90°, una te, dos válvulas de bola y una válvula antirretorno. Las pérdidas de cada uno de los elementos secundarios son las siguientes:

- $h_{m,codo} = 0,1 \text{ mcagua}$
- $h_{m,antirretorno} = 0,29 \text{ mcagua}$
- $h_{m,válvula\ bola} = 0,023 \text{ mcagua}$
- $h_{m,TE} = 0,21 \text{ mcagua}$

Las pérdidas totales del Tramo K son:

$$\Sigma h_K = 0,67 + 0,1 + 0,29 + 2 \cdot 0,023 + 0,21 = 1,32 \text{ mcagua}$$

Sustituyendo en la Ecuación 43 se obtiene la altura de bomba necesaria:

$$0,5 + H_{Bomba} = 1 + 1,32 \rightarrow H_{Bomba} = 1,82 \text{ mcagua}$$

La presión de entrada de agua en el depósito del Venturi es indiferente, por tanto, se ha de buscar una bomba que suministre una presión superior a 0,182 bares y un caudal de 7,06 m³/h. Las bombas serán el mismo modelo que en el resto de tuberías diseñadas, para este trasiego se instalará la bomba con menores prestaciones, RFXA 32-12/1,5, caudal de 6 m³/h y presión 2,1 bares.

En la Tabla 26 se presentan los detalles de las tuberías instaladas, se han intentado unificar, en la medida de lo posible, los diámetros empleados. Las especificaciones de las válvulas instaladas en los diferentes tramos de tubería se resumen en la Tabla 27.

En la Tabla 28 se especifican los modelos de bomba, todas son electrobombas monoblock RFXA [32], así como la potencia nominal y el caudal y la presión que más se asemejan a las condiciones de trabajo. Las bombas cuya etiqueta termina con el número 1 son las que estarán activas, las que finalizan con el número 2 hacen referencia a la bomba de reserva.

Tabla 26. Detalle de las tuberías de agua.

EQUIPO LAVADO DE GASES	ETIQUETA TRAMO	INICIO	FIN	L (m)	Q (m ³ /s)	DN (mm)	D _{int} (mm)	MATERIAL	ACCESORIOS			
									CODO 90°	VÁLVULAS	TE	REDUCCIÓN
VENTURI	A	Depósito	Garganta	4,41	9·10 ⁻³	90	83	PP	2	3	1	-
VENTURI	B	Depósito	Garganta	4,41	9·10 ⁻³	90	83	PP	2	3	1	-
VENTURI	C	Depósito	Reactor 1	14,1	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	2	3	1	-
VENTURI	D	Depósito	Reactor 2	26,2	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	4	3	1	-
VENTURI	E	Depósito	Cubeto purga	0,40	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	-	1	-	-
VENTURI	F	Toma de agua de red	Depósito	1,4	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	-	1	-	-
TORRE DE ASPERSIÓN	G	Parte inferior de la torre	Nivel superior de pulverizadores	8,06	0,013	110	97,4	PP	2	3	1	1
TORRE DE ASPERSIÓN	H	Parte inferior de la torre	Nivel inferior de pulverizadores	7,74	0,013	110	97,4	PP	2	3	1	1
TORRE DE ASPERSIÓN	I	Parte inferior de la torre	Cubeto purga	0,40	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	-	1	-	-
TORRE DE ASPERSIÓN	J	Toma de agua de red	Torre de aspersión	1	2,78·10 ⁻⁴	20	16,4	PP	-	1	-	-
TORRE DE ASPERSIÓN	K	Parte inferior de la torre	Venturi	10	1,96·10 ⁻³	50	40,8	PP	1	3	1	-
TORRE DE ASPERSIÓN	PULVERIZADORES	-	-	3	0,013	50	40,8	PP	-	-	-	1

Tabla 27. Detalle de las válvulas instaladas.

UBICACIÓN	DN TUBERÍA (mm)	ETIQUETA	TIPO DE VÁLVULA	MANUAL / AUTOMÁTICA	DN (mm)	MATERIAL
Tramo A activo aspiración	90	VA11	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo A activo impulsión	90	VA12	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo A activo impulsión	90	VA13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	90	PVC
Tramo A reserva aspiración	90	VA21	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo A reserva impulsión	90	VA22	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo A reserva impulsión	90	VA23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	90	PVC
Tramo B activo aspiración	90	VB11	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo B activo impulsión	90	VB12	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo B activo impulsión	90	VB13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	90	PVC
Tramo B reserva aspiración	90	VB21	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo B reserva impulsión	90	VB22	DE BOLA	MANUAL	90	PVC
Tramo B reserva impulsión	90	VB23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	90	PVC
Tramo C activo aspiración	20	VC11	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo C activo impulsión	20	VC12	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo C activo impulsión	20	VC13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	20	PVC
Tramo C reserva aspiración	20	VC21	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo C reserva impulsión	20	VC22	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo C reserva impulsión	20	VC23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	20	PVC
Tramo D activo aspiración	20	VD11	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo D activo impulsión	20	VD12	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo D activo impulsión	20	VD13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	20	PVC
Tramo D reserva aspiración	20	VD21	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo D reserva impulsión	20	VD22	DE BOLA	MANUAL	20	PVC
Tramo D reserva impulsión	20	VD23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	20	PVC
Tramo E	20	VE1	DE BOLA	AUTOMÁTICA	20	INOX
Tramo F	20	VF1	DE BOLA	AUTOMÁTICA	20	INOX
Tramo G activo aspiración	110	VG11	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo G activo impulsión	110	VG12	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo G activo impulsión	110	VG13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	110	PVC
Tramo G reserva aspiración	110	VG21	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo G reserva impulsión	110	VG22	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo G reserva impulsión	110	VG23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	110	PVC
Tramo H activo aspiración	110	VH11	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo H activo impulsión	110	VH12	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo H activo impulsión	110	VH13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	110	PVC
Tramo H reserva aspiración	110	VH21	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo H reserva impulsión	110	VH22	DE BOLA	MANUAL	110	PVC
Tramo H reserva impulsión	110	VH23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	110	PVC
Tramo I	20	VI1	DE BOLA	AUTOMÁTICA	20	INOX
Tramo J	20	VJ1	DE BOLA	AUTOMÁTICA	20	INOX

Tabla 27 (continuación). Detalle de las válvulas instaladas.

UBICACIÓN	DN TUBERÍA (mm)	ETIQUETA	TIPO DE VÁLVULA	MANUAL / AUTOMÁTICA	DN (mm)	MATERIAL
Tramo K activo aspiración	50	VK11	DE BOLA	MANUAL	50	PVC
Tramo K activo impulsión	50	VK12	DE BOLA	MANUAL	50	PVC
Tramo K activo impulsión	50	VK13	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	50	PVC
Tramo K reserva aspiración	50	VK21	DE BOLA	MANUAL	50	PVC
Tramo K reserva impulsión	50	VK22	DE BOLA	MANUAL	50	PVC
Tramo K reserva impulsión	50	VK23	ANTIRRETORNO	AUTOMÁTICA	50	PVC

Tabla 28. Características de las bombas instaladas.

EQUIPO LAVADO DE GASES	DESCRIPCIÓN	ETIQUETA	MODELO	Pot nominal (kW)	P _{trabajo} (bar)	Q _{trabajo} (m ³ /h)
LAVADOR VENTURI	Recirculación de agua	BVA1	RFXA 40-16/5,5	4	2,9	36
LAVADOR VENTURI	Recirculación de agua	BVA2	RFXA 40-16/5,5	4	2,9	36
LAVADOR VENTURI	Recirculación de agua	BVB1	RFXA 40-16/5,5	4	2,9	36
LAVADOR VENTURI	Recirculación de agua	BVB2	RFXA 40-16/5,5	4	2,9	36
LAVADOR VENTURI	Alimentación Reactor 1	BVC1	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6
LAVADOR VENTURI	Alimentación Reactor 1	BVC2	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6
LAVADOR VENTURI	Alimentación Reactor 2	BVD1	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6
LAVADOR VENTURI	Alimentación Reactor 2	BVD2	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6
TORRE DE ASPERSIÓN	Recirculación de agua	BTG1	RFXA 65-20/30	22	6,3	60
TORRE DE ASPERSIÓN	Recirculación de agua	BTG2	RFXA 65-20/30	22	6,3	60
TORRE DE ASPERSIÓN	Recirculación de agua	BTH1	RFXA 65-20/30	22	6,3	60
TORRE DE ASPERSIÓN	Recirculación de agua	BTH2	RFXA 65-20/30	22	6,3	60
TORRE DE ASPERSIÓN	Trasiego a lavador Venturi	BTK1	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6
TORRE DE ASPERSIÓN	Trasiego a lavador Venturi	BTK2	RFXA 32-12/1,5	1,1	2,1	6

CAPÍTULO 10. INSTRUMENTACIÓN

Para poder automatizar y controlar la instalación de lavado de gases diseñada es necesario disponer de una serie de instrumentación: niveles, sensores y caudalímetros, que una vez establecidos unos valores predeterminados de trabajo permitan el correcto funcionamiento de la instalación.

10.1. SENSORES DE NIVEL

Se van a instalar dos sensores de nivel uno en el depósito de agua del lavador Venturi y el segundo en la parte inferior de la torre de aspersión. Con estos sensores de nivel se quiere controlar el nivel de llenado de los equipos para evitar que las bombas caviten en caso de falta de agua, antes de bajar del nivel mínimo la señal del nivel mandaría abrir la válvula de llenado de agua, o que los equipos se inunden, cuando se alcanza el nivel máximo el nivel envía la señal de cierre a la válvula. Para el depósito del Venturi el rango de nivel se encuentra entre 0,55 y 1,10 m, a 1,2 m se encuentra la entrada del gas residual. En la torre de aspersión el rango de nivel es más limitado, nivel mínimo en 0,55 m y nivel máximo 0,65 m, debido a que el conducto de entrada del gas se ubica a 0,66 m.

El tipo de sensor que se va a instalar es un sensor de nivel capacitivo apto para aguas con componentes ácidos. Las características técnicas del sensor se describen a continuación [34]:

- Voltaje de salida: 0,25 – 4,75V DC
- Rendimiento resistivo: 10 – 180 Ω o 240 – 33 Ω
- Salida de corriente: 4 – 20 mA
- Tensión de alimentación: 5 a 32V DC
- Corriente de suministro: <20 mA
- Resolución: 20 bits (4096 puntos sobre la distancia de medición)
- Frecuencia de salida: 100 Hz (Resistiva) y 10 Hz (0-10V y 4-20mA)
- Longitud de la sonda de medida: 1000mm
- Temperatura de funcionamiento: -40 °C a 86 °C

10.2. SENSORES DE pH Y CONDUCTIVIDAD

Para comprobar el estado de saturación del agua de lavado es necesario disponer de sensores de pH y conductividad en línea. La medida del pH da información acerca de la acidez del agua y la conductividad de la cantidad de sales disueltas en la misma. Con el fin de controlar la calidad

del agua se establecen unos niveles de pH óptimos y un nivel de pH máximo y mínimo en el cual se ha de purgar el agua para evitar problemas de acidez o de generación de sales. El nivel de pH máximo se puede establecer en 8 y el nivel mínimo en 3, cuando el agua exceda cualquiera de estos niveles se purgará el agua hasta obtener un nivel de pH dentro del rango indicado. En cuanto a la conductividad tan solo se marca un valor máximo, el cual se puede estimar en 110 mS/cm, es el valor utilizado actualmente en el resto de lavadores de gases de la fábrica y se ha comprobado que con ese valor de conductividad no se produce generación de sales [4].

En cada uno de los equipos se van a instalar dos sondas de conductividad y dos electrodos de pH. Cada pareja de electrodo de pH y sonda de conductividad estará conectada a una tubería de recirculación de agua y por tanto alimentada por una bomba diferente. Dichas parejas estarán colocadas en los tramos A, B, G y H.

Las sondas de conductividad que se van a usar son de *Hanna Instruments* con un rango de medición de 0,00 a 199,9 mS/cm (HI 7638). Cada sonda de conductividad ha de ir acompañada de un transmisor de conductividad.

La sonda dispone de cuatro anillos de platino, cuerpo plástico y vidrio y sensor de temperatura [35].

Las características del transmisor HI 8936AL son las siguientes [35]:

- Rango: 0 a 199,9 mS/cm
- Resolución: 0,1 mS/cm
- Salida: 4-20 mA
- Alimentación: 17-36V DC

En cuanto a la medición de pH también se utilizará instrumentación de *Hanna Instruments*. Para la medición del pH se requiere un electrodo de pH, en concreto se trata de un electrodo con cuerpo plástico, unión de fibra y conector tipo T (HI 1210T). Junto con el electrodo de pH se colocará una sonda de temperatura (HI 76608) que permitirá la corrección automática del pH en función de la temperatura por parte del transmisor. Además, gracias a la sonda de temperatura se podrá conocer la temperatura del agua de lavado y alertar si supera un límite establecido. Las características del transmisor de pH HI 8614 L son las siguientes [35]:

- Rango: 0 a 14 pH
- Resolución: 0,01 pH
- Salida: 4-20 mA
- Alimentación: 20-36V DC

10.3. CAUDALÍMETROS

En las tuberías de recirculación del agua de lavado es necesario instalar caudalímetros que permitan conocer el caudal que se está bombeando. Conocer el caudal instantáneo permite ajustar la velocidad de la bomba hasta obtener el caudal necesario para el adecuado lavado de los gases.

El caudalímetro que se va a instalar en los tramos A, B, G y H, es un caudalímetro de la marca YOKOGAWA, en concreto, el modelo ADMAG CA, un caudalímetro de tipo magnético. Las especificaciones del caudalímetro se detallan a continuación [36]:

- Tamaño: 15 – 200 mm
- Velocidad del fluido: 0,5 – 10 m/s
- Conductividad mínima del fluido: 0,01 $\mu\text{S/cm}$
- Presión: -0,1 – 4 MPa
- Temperatura: -10 – 120 °C
- Salida: 4-20 mA DC
- Alimentación: 100-130 V DC
- Potencia máxima consumida: 14 W

10.4. MANÓMETROS

Al inicio de las tuberías rectas de los tramos A, B, G y H se colocará un manómetro en línea para poder conocer visualmente la presión del fluido a través de la tubería. Se va a emplear un manómetro con muelle tubular de la marca Genebre, referencia 8012, y sus características son [37]:

- Rango: 0 – 25 bar
- Temperatura de trabajo: -20 – 60 °C
- Conexión: acero inoxidable salida inferior ½"
- Escala: psi/bar

CAPÍTULO 11. CÁLCULOS ELÉCTRICOS

La alimentación de tensión a los equipos del sistema de lavado de gases se hará desde un cuadro secundario destinado para tal uso el cual es alimentado a partir del cuadro eléctrico principal. El suministro eléctrico se realiza desde un centro de transformación propio de la industria. Para realizar los cálculos de la línea de baja tensión que alimenta directamente a los equipos desde el cuadro secundario se seguirá el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión aprobado por el Real Decreto 842/2002.

11.1. POTENCIA REQUERIDA EN LA INSTALACIÓN

La potencia requerida se calcula a partir de las instalaciones receptoras. Los equipos que requieren conexión eléctrica son el ventilador, las bombas, los transmisores, las sondas de nivel y los caudalímetros.

En la Tabla 29 se detallan las potencias nominales a instalar requeridas por cada equipo. La potencia nominal se calcula dividiendo la potencia del eje por el rendimiento del motor. En todas las bombas se ha supuesto un rendimiento de motor del 75%.

La potencia de la instalación será igual a la suma de las potencias individuales, es decir, 238,156 kW. Se ha aplicado un coeficiente de simultaneidad igual a 1. En la Tabla 29 también se detalla la tensión nominal a la que trabajan los equipos. No se ha tenido en cuenta el consumo de los equipos de instrumentación por ser muy inferior a la del resto de los equipos.

Tabla 29: Potencia requerida por los equipos.

EQUIPO	ETIQUETA	POTENCIA NOMINAL (W)	TENSIÓN NOMINAL (V)
VENTILADOR	VL	75000	240
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA1	4000	240
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA2	4000	240
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB1	4000	240
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB2	4000	240
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC1	1100	240
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC2	1100	240
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD1	1100	240
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD2	1100	240
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG1	22000	240
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG2	22000	240
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH1	22000	240
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH2	22000	240
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK1	1100	240
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK2	1100	240

11.2. ELECCIÓN DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR

Para la elección del conductor se utilizarán las tablas de la Norma UNE 20460-5-523: 2004.

Los conductores desde el cuadro secundario hasta cada una de las conexiones se instalarán aéreos, el material de los mismos será cobre y el aislamiento empleado Polietileno Reticulado (XLPE).

11.2.1. Dimensionamiento de conductores por caída de tensión

El procedimiento de dimensionamiento por caída de tensión es el siguiente [38]:

- 1) Cálculo de la intensidad nominal de cada línea, para líneas trifásicas:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad (44)$$

donde,

- P_n : potencia nominal de la línea (W)
- U_n : tensión nominal de la línea (V)
- $\cos \varphi$: factor de potencia

- 2) Obtener la intensidad de diseño aplicando un coeficiente de corrección igual a 1,25% a la intensidad nominal de la línea [39, ITC-BT-47].
- 3) En la Figura 34 se elige el método de instalación de referencia de los conductores y el aislamiento de los mismos.

Tabla B.52.1 – Métodos de instalación de referencia que forman la base de las corrientes admisibles tabuladas







Método de instalación de referencia		Tabla y columna							Factor de temperatura ambiente	Factor de reducción por agrupamiento
		Corrientes admisibles para los circuitos simples					Factor de temperatura ambiente	Factor de reducción por agrupamiento		
		Aislamiento termoplástico	Aislamiento termoestable	Aislamiento mineral	Número de conductores aislados					
		2	3	2	3	2 y 3				
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Conductores aislados (cables unipolares) en un tubo en una pared térmicamente aislante	A1	B.52.2 Col. 2	B.52.4 Col. 2	B.52.3 Col. 2	B.52.5 Col. 2	-	B.52.14	B.52.17	
	Cable multipolar en un tubo en una pared térmicamente aislante	A2	B.52.2 Col. 3	B.52.4 Col. 3	B.52.3 Col. 3	B.52.5 Col. 3	-	B.52.14	B.52.17 Excepto D (aplica la tabla B.52.19)	
	Conductores aislados (cables unipolares) en un tubo sobre una pared de madera	B1	B.52.2 Col. 4	B.52.4 Col. 4	B.52.3 Col. 4	B.52.5 Col. 4	-	B.52.14	B.52.17	
	Cable multipolar en un tubo sobre una pared de madera	B2	B.52.2 Col. 5	B.52.4 Col. 5	B.52.3 Col. 5	B.52.5 Col. 5	-	B.52.14	B.52.17	
	Cable unipolar o multipolar sobre una pared de madera	C	B.52.2 Col. 6	B.52.4 Col. 6	B.52.3 Col. 6	B.52.5 Col. 6	Cubierta 70 °C B.52.6 Cubierta 105 °C B.52.7	B.52.14	B.52.17	
	Cable multipolar en conductos en el suelo	D	B.52.2 Col. 7	B.52.4 Col. 7	B.52.3 Col. 7	B.52.5 Col. 7	-	B.52.15	B.52.19	

Figura 34. Métodos de instalación de referencia. [40]

- 4) Con el código obtenido, se determinará el tipo de cable y de aislamiento a emplear, y con el valor de I_{dis} se determina el tamaño de la sección según las tablas descritas en la norma, el tamaño elegido es aquel cuya intensidad admisible es inmediatamente superior a I_{dis} .
- 5) Calcular la caída de tensión a lo largo de la línea trifásica a partir de la siguiente expresión.

$$\varepsilon = \frac{L \cdot \rho \cdot P_n}{S \cdot U_n^2} \cdot 100 \quad (45)$$

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

donde,

- L: longitud de la línea (m)
- ρ : resistividad del material de la línea ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- S: sección de la línea (mm^2)

Para que el tamaño del conductor sea admitido la caída de tensión desde el origen de la instalación hasta el punto de conexión ha de ser inferior al 5% para usos diferentes al alumbrado [38].

**Tabla B.52.5 – Corrientes admisibles, en amperios, para los métodos de la tabla B.52.1 –
Cables aislados con XLPE/EPR, tres conductores cargados, cobre o aluminio –
Temperatura del conductor: 90 °C, temperatura ambiente 30 °C en el aire, 20 °C en el terreno**

Sección nominal del conductor mm^2	Método de instalación de la tabla B.52.1						
	A1	A2	B1	B2	C	D	D2
	2	3	4	5	6	7	8
Cobre							
1,5	17	16,5	20	19,5	22	21	23
2,5	23	22	28	26	30	28	30
4	31	30	37	35	40	36	39
6	40	38	48	44	52	44	49
10	54	51	66	60	71	58	65
16	73	68	88	80	96	75	84
25	95	89	117	105	119	96	107
35	117	109	144	128	147	115	129
50	141	130	175	154	179	135	153
70	179	164	222	194	229	167	188
95	216	197	269	233	278	197	226
120	249	227	312	268	322	223	257
150	285	259	342	300	371	251	287
185	324	295	384	340	424	281	324
240	380	346	450	398	500	324	375
300	435	396	514	455	576	365	419
Aluminio							
2,5	19	18	22	21	24	22	
4	25	24	29	28	32	28	
6	32	31	38	35	41	35	
10	44	41	52	48	57	46	
16	58	55	71	64	76	59	64
25	76	71	93	84	90	75	82
35	94	87	116	103	112	90	98
50	113	104	140	124	136	106	117
70	142	131	179	156	174	130	144
95	171	157	217	188	211	154	172
120	197	180	251	216	245	174	197
150	226	206	267	240	283	197	220
185	256	233	300	272	323	220	250
240	300	273	351	318	382	253	290
300	344	313	402	364	440	286	326

NOTA En las columnas 3, 5, 6, 7 y 8, se supone que los conductores son circulares para un tamaño de hasta 16 mm² inclusive. Los valores indicados para mayores tamaños se refieren a conductores perfilados y pueden ser aplicados con seguridad a los conductores circulares.

Figura 35. Intensidades admisibles en amperios para cables aislados con XLPE/EPR. [40]

11.2.2. Dimensión de los conductores

En la Tabla 30 se recogen los parámetros necesarios para calcular la sección así como la sección de cada línea aplicando el criterio de dimensionamiento por caída de tensión, descrito anteriormente. Para todas las líneas se ha considerado el método de instalación de referencia B2, Figura 34, cable multipolar en un tubo sobre una pared de madera. Según esta instalación de referencia se han de usar cables aislados con XLPE/EPR, tres conductores cargados, cobre o aluminio. La Figura 35 representa la tabla a la que hace referencia la Norma. Cada línea partirá desde el cuadro secundario hasta el elemento receptor.

Los cables serán de cobre, por lo que para el cálculo de la caída de tensión se tomará el valor de la resistividad del cobre a 90 °C, 0,02198 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Tabla 30. Parámetros de diseño de sección, sección según Norma UNE-HD 60364-5 y caída de tensión de la línea.

EQUIPO	ETIQUETA	L (m)	U _n (V)	P _n (W)	cos φ	I _n (A)	I _{dis} (A)	S (mm ²)	I _{adm} sección (A)	ϵ (%)
VENTILADOR	VL	21	400	75000	0,90	120,28	150,35	50	154	0,14
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA1	20	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	19,5	0,73
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA2	20	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	19,5	0,73
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB1	21	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	19,5	0,77
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB2	21	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	19,5	0,77
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC1	16,5	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,17
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC2	16,5	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,17
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD1	18	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,18
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD2	18	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,18
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG1	14,5	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	60	0,44
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG2	14,5	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	60	0,44
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH1	19	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	60	0,57
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH2	19	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	60	0,57
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK1	16	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,16
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK2	16	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	19,5	0,16

Como se puede observar en la Tabla 30, las caídas de tensión individuales de todas las líneas son inferiores al 5%, por lo que las secciones de línea diseñadas son adecuadas.

11.2.3. Características del cable elegido

El cable que se va a instalar es un cable tipo ACEFLEX E_{ca}, denominado genéricamente como RV-K. Se trata de un cable trifásico con conductor de aluminio, aislamiento XLPE3 y tensión nominal 0,6/1 kV. En la Figura 36 se detallan las características del cable. La instalación de las líneas desde el cuadro eléctrico hasta cada uno de los elementos se realizará de forma aérea sobre bandejas.

Como las características del cable comercial difieren de las presentadas en la Norma UNE 20460 es necesario repetir los cálculos con los parámetros reales del cable. Los resultados se presentan en la Tabla 31.

NÚMERO DE CONDUCTORES x SECCIÓN mm ²	ESPESOR DE AISLAMIENTO mm (t)	DIÁMETRO EXTERIOR mm (t)	PESO TOTAL kg/km (t)	RESISTENCIA DEL CONDUCTOR a 20 °C Ω /km	INTENSIDAD ADMISIBLE (2) A	INTENSIDAD ADMISIBLE ENTERRADO (3) A	CAÍDA DE TENSIÓN V/A km (2)	
							cos φ = 1	cos φ = 0,8
3 G 1,5	0,7	9,2	110	13,3	23	24	30,98	24,92
3 G 2,5	0,7	10,1	150	7,98	32	32	18,66	15,07
3 G 4	0,7	11,1	200	4,95	44	42	11,68	9,46
3 G 6	0,7	12,3	270	3,3	57	53	7,90	6,42
3 G 10	0,7	14,7	415	1,91	78	70	4,67	3,84
3 G 16	0,7	18	639	1,21	104	91	2,94	2,45
3 x 25	0,9	21,4	946	0,78	115	96	1,62	1,38
3 x 35	0,9	25,1	1355	0,554	143	117	1,17	1,01
3 x 50	1	28,8	1900	0,386	174	138	0,86	0,77
3 x 70	1,1	32,3	2550	0,272	223	170	0,6	0,56
3 x 95	1,1	35,9	3290	0,206	271	202	0,43	0,42
3 x 120	1,2	39,2	4060	0,161	314	230	0,34	0,35
3 x 150	1,4	44,2	5070	0,129	359	260	0,28	0,3
3 x 185	1,6	50,3	6400	0,106	409	291	0,22	0,26
3 x 240	1,7	56,7	8200	0,0801	489	336	0,17	0,21
3 x 300	1,8	62,2	10450	0,0641	549	380	0,14	0,18

(1) Valores aproximados.

(2) Instalación en bandeja al aire (40 °C).
 → XLPE3 con instalación tipo F → columna 11 (1x trifásica).
 → XLPE2 con instalación tipo E → columna 12 (2x, 3G monofásica).
 → XLPE3 con instalación tipo E → columna 10b (3x, 4G, 4x, 5G trifásica).

(3) Instalación enterrada, directamente o bajo tubo con resistividad térmica del terreno estándar de 2,5 K.m/W.
 → XLPE3 con instalación tipo Método D1/D2 (Cu) → 1x, 3x, 4G, 4x, 5G trifásica.
 → XLPE2 con instalación tipo D1/D2 (Cu) → 2x, 3G monofásica.

Según UNE-HD 60364-5-52 e IEC 60364-5-52.

Figura 36. Datos técnicos cable ACEFLEX Eca. [41]

Las secciones finales para las líneas son las indicadas en la Tabla 31. Para el nuevo cable ninguna línea tiene una caída de tensión superior al 5%.

La alimentación de los equipos de instrumentación se realizará en líneas independientes para cada uno de estos equipos. Las líneas de alimentación serán monofásicas e irán instaladas sobre bandejas aéreas. El número de conductores será dos y el cable será de cobre de sección 2,5 mm² y aislamiento XLPE, por lo que podrán admitir una intensidad máxima de 30 A.

Tabla 31. Caída de tensión de la línea y sección comercial para el cable ACEFLEX.

EQUIPO	ETIQUETA	L (m)	U_n (V)	P_n (W)	$\cos \varphi$	I_n (A)	I_{dis} (A)	S (mm ²)	I_{adm} sección (A)	ε (%)
VENTILADOR	VL	21	400	75000	0,90	120,28	150,35	50	138	0,14
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA1	20	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	23	0,73
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVA2	20	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	23	0,73
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB1	21	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	23	0,77
BOMBA RECIRCULACIÓN VENTURI	BVB2	21	400	4000	0,90	6,42	8,02	1,5	23	0,77
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC1	16,5	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,17
BOMBA VENTURI A REACTOR 1	BVC2	16,5	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,17
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD1	18	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,18
BOMBA VENTURI A REACTOR 2	BVD2	18	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,18
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG1	14,5	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	78	0,44
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTG2	14,5	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	78	0,44
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH1	19	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	78	0,57
BOMBA PULVERIZADORES TORRE DE ASPERSIÓN	BTH2	19	400	22000	0,90	35,28	44,10	10	78	0,57
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK1	16	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,16
BOMBA TRASIEGO DE TORRE A VENTURI	BTK2	16	400	1100	0,90	1,76	2,21	1,5	23	0,16

11.3. CUADRO ELÉCTRICO

El cuadro eléctrico secundario al que están conectados los equipos del sistema de lavado de gases está compuesto de los siguientes elementos:

- Un disparador electromagnético a la entrada del cuadro.
- Quince variadores de frecuencia, uno para cada motor.
- Un interruptor automático antes de la entrada de tensión a cada variador de frecuencia.

Los elementos del cuadro eléctrico han de estar protegidos frente a sobrecargas y cortocircuitos. En el caso de los motores la protección está integrada en el variador de frecuencia. Por lo que son necesarias protecciones a la entrada del cuadro secundario desde el cuadro principal y en la conexión a los variadores.

El disparador electromagnético colocado a la entrada del cuadro secundario ha de cumplir las siguientes características [38]:

- $I_n=350$ A (tensión nominal del cuadro completo calculada a partir de la Ecuación 44 para un factor de potencia igual a 1).
- Margen superior de actuación: $I_a=20 \cdot I_n$. Respondiendo a una curva tipo D, apropiada para la protección de equipos con intensidades de arranque elevadas.
- Tiempo límite de actuación: inferior a 0,1 s.
- Poder de corte es característico de cada interruptor automático, el modelo elegido presenta un poder de corte igual a 50 kA en 380/415 V CA 50/60 Hz.

El interruptor automático de cada variador depende de la intensidad nominal de cada línea. El poder de corte de estos interruptores automáticos es 16 kA.

Los variadores de velocidad que se van a instalar son de la marca Schneider, en concreto, el modelo Altivar ATV630, tensión de alimentación 380/480 y tensión de salida igual o inferior a la de alimentación.

CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES

El estudio de caracterización del gas en la fase de reacción del proceso de solubilización ha permitido concluir que durante esta etapa se genera una corriente de gas residual con una elevada concentración de partículas, la mayoría de ellas de tamaño mayor a $7,5 \mu\text{m}$; la corriente contiene también ácido fluorhídrico y, en menor medida, ácido clorhídrico.

Tras analizar las Mejores Técnicas Disponibles para el tratamiento de las emisiones atmosféricas de la industria de los fertilizantes se ha optado por un sistema compuesto de varias etapas: una primera etapa en la que se eliminan las partículas de mayor tamaño, y una segunda, y en caso necesario una tercera etapa, para eliminar las partículas de menor tamaño y depurar los contaminantes ácidos. Como técnica para la primera etapa se ha seleccionado un ciclón, por presentar un alto rendimiento para partículas de tamaño superior a $75 \mu\text{m}$ y requerir unos costes de operación anuales por debajo del resto de técnicas de este tipo. Para la segunda etapa, la técnica escogida ha sido el lavador Venturi debido a que las características de la corriente residual se encuentran dentro de los límites de aplicación del mismo. En la tercera etapa, en caso de ser necesaria, se instalará una torre de aspersión por su alto rendimiento en eliminación de partículas de menor tamaño. En las etapas de lavado de gases ácidos, se ha seleccionado como líquido de lavado agua, debido a que el ácido clorhídrico y el ácido fluorhídrico son gases fuertes y, por tanto, se considera que se disocian completamente en agua. Después de realizar el diseño de los equipos para la corriente residual a tratar, se obtienen los siguientes rendimientos teóricos para la eliminación de partículas: 99,37 % en el ciclón y 17,67 % en el lavador Venturi. La diferencia de rendimientos se debe a que en el Venturi se ha optado por lograr un equilibrio entre captación de partículas, con el objetivo de no alcanzar el límite máximo legal, depuración de los gases ácidos y limitación de la pérdida de presión y consiguiente gasto extra de energía en el equipo. No obstante, con los rendimientos obtenidos para partículas, el contenido de las mismas en las emisiones atmosféricas finales se encuentra dentro del límite legal. En el caso de los gases ácidos se considera un rendimiento del 100 % debido a los caudales de líquido de lavado seleccionados, superiores a la relación líquido de lavado/gas a tratar obtenidos.

Para el correcto funcionamiento del sistema de tratamiento de gases se ha llevado a cabo el estudio de las conducciones de aire y de las conducciones hidráulicas. El desarrollo del diseño del sistema de aspiración concluye que la chimenea de evacuación de los gases residuales a la atmósfera ha de tener una longitud de 22 m sobre el nivel del suelo. En cuanto a las conducciones hidráulicas es necesario su diseño en el lavador Venturi y en la torre de aspersión; se han proyectado conducciones para recirculación del agua de lavado, alimentación de agua de lavado en los reactores en el proceso productivo (purga constante), alimentación de agua de red a los equipos, purga auxiliar y trasiego de agua de lavado desde la torre de aspersión hasta el lavador Venturi. En todas las conducciones en las que se requería

impulsar el agua se han dispuesto dos bombas, una de funcionamiento normal y una de reserva por cuestiones de mantenimiento.

Los equipos de instrumentación que se instalarán permitirán la automatización y control del sistema de tratamiento de gases. En concreto, los caudalímetros permitirán conocer el caudal de agua recirculado y ajustar la frecuencia, gracias al variador de frecuencia, de la bomba en busca del estipulado; las sondas de nivel permitirán mantener un nivel de agua en los equipos suficiente y constante; y los sensores de pH y los electrodos de conductividad permitirán conocer la saturación del agua de lavado, permitiendo purgar automáticamente según los valores preestablecidos.

Por último, cabe indicar que tras la instalación del nuevo sistema de depuración de gases sería necesario solicitar a la autoridad competente, en este caso, la Dirección General de Aragón, una modificación puntual de la Autorización Ambiental Integrada, debido a que las características del Foco 3: Captación solubilización variarán respecto a las actuales.

CAPÍTULO 13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto 506/2003, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
- [2] FAO, IFA, 4th edition, revised version, Rome, Italy, 2002. "Los fertilizantes y su uso. Una guía de bolsillo para los oficiales de extensión".
- [3] ANFFE, Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes. <http://www.anffe.com/noticias/2008/2008-06-02%20La%20importancia%20de%20los%20fertilizantes%20en%20una%20agricultura%20actual%20productiva%20y%20sostenible/LA%20IMPORTANCIA%20DE%20LOS%20FERTILIZANTES.pdf>. Recuperado el día 09/06/2018.
- [4] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/estadisticas-medios-produccion/fertilizantes.aspx. Recuperado el día 28/05/2018.
- [5] ANFFE, Asociación Nacional de Fabricantes de Fertilizantes, <http://www.anffe.com/informaci%F3n%20sectorial/localizaci%F3n%20F%1bricas%20Espa%1olas/index.html>. Recuperado el día 02/06/2018.
- [6] Fertinagro Biotech.
- [7] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.
- [8] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación.
- [9] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- [10] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación.
- [11] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de protección del ambiente atmosférico.
- [12] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.

- [13] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- [14] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Real Decreto 39/2017, de 27 de enero, por el que se modifica el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- [15] Boletín Oficial de Aragón número 42 del 11 de abril de 2008. RESOLUCIÓN de 28 de marzo de 2008, del Instituto Aragonés de Gestión Ambiental, por la que se otorga la Autorización Ambiental Integrada para la Instalación existente de fabricación de abonos y compuestos nitrogenados fertilizantes, promovido por Agrimartín Fertilizantes, S.L., ubicada en el término municipal de Sarrión (Teruel) (Expte INAGA/500301/02.2006/10812).
- [16] *European Commission, August 2007. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers.* Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, <http://www.prtr-es.es/documentos/documentos-mejores-tecnicas-disponibles>. Recuperado el día 09/06/2018.
- [17] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009. "Sistemas de gestión y tratamiento de aguas y gases residuales en el sector químico: mejores técnicas disponibles de referencia europea: documento BREF."
- [18] S&P Sistemas de Ventilación, S.L.U. <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-depuracion-del-aire-filtros-ii/>. Recuperado el día 02/06/2018.
- [19] Héctor Jorquera González, "Introducción a la contaminación atmosférica".
- [20] Agencia para la Protección Ambiental de los EE. UU., *United States Environmental Protection Agency*, EPA/452/B-02-001, Capítulo 2: Torres de limpieza húmedas para materia particulada.
- [21] Brentwood Industries, <http://es.brentwoodindustries.com/productos/torre-de-enfriamiento/eliminadores-de-rocio/celulares/>. Recuperado el día 12/07/2018.
- [22] Shuchen B. Thakore and Bharat I. Bhatt, Tata McGraw-Hill, 2007. "*Introduction to Process Engineering and Design*".
- [23] Máster en Ingeniería Industrial especialidad en Medio Ambiente y Sostenibilidad Industrial, Curso Académico 2016/2017, Universitat Politècnica de València. Apuntes Control y Corrección de Emisiones Atmosféricas, Tema 5: Tratamientos y técnicas para el control de los contaminantes atmosféricos.
- [24] Verlek Ingeniería SAS, <http://verlek.com/wp-content/uploads/2017/12/e-aspersorio-cono-lleno.pdf>. Recuperado el día 14/07/2018.
- [25] Auxiliar de instalaciones químicas S.A., AIQSA, <http://www.aiqsa.com/tarifas/pdf/AIQSA%20PP%20TOPE%20ELECTROFUSION%20BRIDAS.pdf>. Recuperado el día 26/07/2018.

- [26] Generalitat Valenciana. Conselleria de Treball i Afers Socials. Direcció General de Treball. "Ventilación Industrial". (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Industrial Ventilation. 20th Edition of Recommended Practice, 1988.*)
- [27] Máster en Ingeniería Industrial, Curso Académico 2015/2016, Universitat Politècnica de València. Apuntes Instalaciones de Fluidos, Tema 1: Fundamentos de Instalaciones de Fluidos.
- [28] BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO. Orden de 18 de Octubre de 1976 sobre prevención y corrección de la contaminación industrial de la atmósfera.
- [29] Gobierno Vasco, Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca. Instrucción Técnica – 07 (IT-07): Altura de Chimeneas.
- [30] Máster en Ingeniería Industrial especialidad en Medio Ambiente y Sostenibilidad Industrial, Curso Académico 2016/2017, Universitat Politècnica de València. Apuntes Dispersión de Contaminantes en Agua y Atmósfera, Tema 4: La chimenea, elemento emisor de fuentes puntuales.
- [31] S&P Sistemas de Ventilación, S.L.U. Catálogo Aplicaciones Industriales. www.solerpalau.com. Recuperado el día 19/08/2018.
- [32] Bombas Ideal, S.A. Catálogo Distribución. <http://www.bombasideal.com/wp-content/uploads/catalogos/C9.pdf>. Recuperado el día 23/08/2018.
- [33] Salvador Escoda, S.A. Tarifa de precios válvulas automáticas Enero 2017. http://www.salvadorescoda.com/tarifas/Valvulas_Automaticas_PVP_SalvadorEscoda.pdf. Recuperado el día 26/08/2018.
- [34] SENSOVANT. Sensor de nivel para aguas residuales, <http://sensovant.com/productos/caudal-nivel-fluidos/sensores-Nivel-de-liquidos/sensores-capacitivos/articulo/sensor-de-nivel-aguas-residuales-GS-level-7014.html>. Recuperado el día 26/08/2018.
- [35] *Hanna Instruments*. Procesos, medida en continuo, transmisores. <http://www.hannainst.es/catalogo-productos/procesos-medida-en-continuo/transmisores>. Recuperado el día 27/08/2018.
- [36] YOKOGAWA. Catálogo *ADMAG Handbook Frontpage/Yokogawa Flow Solution*. <https://web-material3.yokogawa.com/LF01E00A00-01EN.us.pdf>. Recuperado el día 27/08/2018.
- [37] Genebre. Ficha técnica manómetro referencia 8012. <https://www.genebre.es/manometro-d100-inox304-psi-bar>. Recuperado el día 27/08/2018.
- [38] José Roger, Martín Riera y Carlos Roldán. "Tecnología eléctrica". 3ª Edición: marzo 2010. Editorial Síntesis, S.A.
- [39] Real Decreto 842/2002, de 2 de Agosto, Ministerio de Ciencia y Tecnología. "Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e Instrucción Técnicas Complementarias (ITC) BT 01 a BT 51.

- [40] Norma UNE-HD 60364-5-52: 2014. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 5: Selección e instalación de equipos eléctricos. Canalizaciones.
- [41] *Prysmian Group*. Cables para instalaciones interiores o receptoras: ACEFLEX E_{ca}.
https://es.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/_PRY-DRK_ACEFLEX%20Eca%20-%20RV-K%20-%201%20kV_20-06-2017-.pdf. Recuperado el día 31/08/2018.

Documento nº 2:
PRESUPUESTO

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

RESUMEN DEL PRESUPUESTO	1
PRESUPUESTO TOTAL.....	3
PRESUPUESTO PARCIAL.....	5

RESUMEN DEL PRESUPUESTO

CAPITULO 01. EQUIPOS PRINCIPALES

Subcapítulo 01.1. Ciclón	31.121,21 €
Subcapítulo 01.2. Lavador Venturi	50.625,80 €
Subcapítulo 01.3. Torre de aspersión	75.313,76 €
TOTAL CAPÍTULO 01. EQUIPOS PRINCIPALES	157.060,77 €

CAPITULO 02. CONDUCCIONES DE AIRE

Subcapítulo 02.1. Conducciones	20.044,17 €
Subcapítulo 02.2. Accesorios de ventilación	7.184,00 €
Subcapítulo 02.3. Ventilador	18.900,00 €
Subcapítulo 02.4. Chimenea	96.800,00 €
TOTAL CAPITULO 2. CONDUCCIONES DE AIRE	142.928,17 €

CAPITULO 3. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS

Subcapítulo 03.1. Conducciones	1.051,11 €
Subcapítulo 03.2. Accesorios	3.408,94 €
Subcapítulo 03.3. Bombas	45.646,00 €
TOTAL CAPITULO 3. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS	50.106,05 €

CAPITULO 04. INSTRUMENTACIÓN

TOTAL CAPITULO 4. INSTRUMENTACIÓN	13.819,36 €
--	--------------------

CAPITULO 05. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA

Subcapítulo 05.1. Línea de distribución	5.166,64 €
Subcapítulo 05.2. Variadores de frecuencia	27.241,39 €
Subcapítulo 05.3. Aparamenta eléctrica	9.658,40 €

TOTAL CAPITULO 5. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA	42.066,43 €
--	--------------------

CAPITULO 06. OBRA CIVIL

Subcapítulo 06.1. Acondicionamiento del terreno	1.675,71 €
Subcapítulo 06.2. Cimentaciones	10.027,60 €
Subcapítulo 06.3. Construcción del cubeto de retención	3.119,05 €

TOTAL CAPITULO 6. OBRA CIVIL	14.822,36 €
-------------------------------------	--------------------

CAPITULO 07. INGENIERÍA

Subcapítulo 07.1. Estudio de alternativas	37.800,00 €
Subcapítulo 07.2. Proyecto de diseño	292.050,00 €
Subcapítulo 07.3. Dirección de obras	6.864,00 €

TOTAL CAPITULO 7. INGENIERÍA	336.714,00 €
-------------------------------------	---------------------

TOTAL CAPÍTULOS	757.517,14 €
------------------------	---------------------

GASTOS GENERALES	<i>15% DEL TOTAL</i>	113.627,57€
------------------	----------------------	--------------------

TOTAL CAPÍTULOS + GASTOS GENERALES	871.144,72 €
------------------------------------	---------------------

IVA (21%)	182.940,39 €
-----------	---------------------

TOTAL PRESUPUESTO	1.054.085,11 €
--------------------------	-----------------------

PRESUPUESTO TOTAL

TOTAL CAPÍTULO 1. EQUIPOS PRINCIPALES	157.060,77 €
TOTAL CAPÍTULO 2. CONDUCCIONES DE AIRE	142.928,17 €
TOTAL CAPÍTULO 3. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS	50.106,05 €
TOTAL CAPÍTULO 4. INSTRUMENTACIÓN	13.819,36 €
TOTAL CAPÍTULO 5. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA	42.066,43 €
TOTAL CAPÍTULO 6. OBRA CIVIL	14.822,36 €
TOTAL CAPÍTULO 7. INGENIERÍA	336.714,00 €
TOTAL CAPÍTULOS	757.517,14 €
GASTOS GENERALES (15% DEL TOTAL)	113.627,57€
TOTAL CAPÍTULOS + GASTOS GENERALES	871.144,72 €
IVA (21%)	182.940,39 €
TOTAL PRESUPUESTO	1.054.085,11 €

El Presupuesto Total asciende a la cantidad de **un millón cincuenta y cuatro mil 85 euros con 11 céntimos.**

PRESUPUESTO PARCIAL

CAPITULO 01. EQUIPOS PRINCIPALES

Subcapítulo 01.1. Ciclón

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C01.1.1.	1	Ud. De	Ciclón calorifugado de 1000 mm de diámetro y 4000 mm de altura. Fabricado en acero inoxidable de 8 mm de espesor. Plataforma sustentación.	30.200,00 €	30.200,00 €
C01.1.2.	1	Ud. De	Válvula de membrana DN250, PP.	921,21 €	921,21 €
					<hr/>
					31.121,21 €

Subcapítulo 01.2. Lavador Venturi

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C01.2.1.	1	Ud. De	Venturi vertical de diámetro de garganta 350 mm y altura 2550 mm. Depósito para evacuación de gases de diámetro 2500 mm y altura 5200. Material de construcción polipropileno, 13 mm, recubierto con fibra de vidrio, 7 mm. Conexión de garganta a depósito.	50.300,00 €	50.300,00 €
C01.2.2.	1	Ud. De	Separador de gotas CF80Max. Diámetro 2500 mm y espesor 133 mm.	325,80 €	325,80 €
					<hr/>
					50.625,80 €

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Subcapítulo 01.3. Torre de aspersión

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C01.3.1.	1	Ud. De	Torre de rociado compacta construida en polipropileno, 13 mm, recubierto con fibra de vidrio, 7 mm. Diámetro 3000 mm y altura total 7700 mm.	83.500,00 €	73.500,00 €
C01.3.2.	1	Ud. De	Separador de gotas Brentwood Industries CF80Max. Material PVC. Diámetro 3000 mm y espesor 133 mm.	390,96 €	390,96 €
C01.3.3.	2	Ud. De	Estructura para difusores diámetro exterior 3000 mm con soportes anclados en la pared interior de la torre, seis ramificaciones interiores rectas en tubería DN50 PN6 y 21 reducciones con salida de agua 1/2" hembra. Todo fabricado en PP.	466,75 €	933,50 €
C01.3.4.	42	Ud. De	Aspersor Verlek modelo FC-FX, fabricado en acero inoxidable, caudal 37 l/min a 3 bar. Conexión 1/2" macho.	11,65 €	489,30 €
					75.313,76 €
<u>TOTAL CAPÍTULO 01. EQUIPOS PRINCIPALES</u>					157.060,77 €

CAPITULO 02. CONDUCCIONES DE AIRE

Subcapítulo 02.1. Conducciones

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C02.1.1.	26	m	Tubería de ventilación AIQSA DN500 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	118,44 €	3.079,44 €
C02.1.2.	2	Ud. De	Codo de 90°, DN500, radio de curvatura 1200mm, fabricado en PP.	554,39 €	1.108,78 €
C02.1.3.	30	m	Tubería de ventilación AIQSA DN710 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	251,81 €	7.554,30 €

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

C02.1.4.	8	Ud. De	Codo de 90°, DN710, radio de curvatura 1715mm, fabricado en PP.	848,96 €	6.791,68 €
C02.1.5.	1	Ud. De	Conexión en forma de Y, ángulo 30°. Dos conexiones DN500 a DN710.	1.509,97 €	1.509,97 €
					<u>20.044,17 €</u>

Subcapítulo 02.2. Accesorios de ventilación

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C02.2.1.	2	Ud. De	Campana de captación fabricada en PP. Dimensiones de la base 484 x 840 mm, altura 727 mm y salida de 484 mm de diámetro.	1.674,61 €	3.349,22 €
C02.2.2.	2	Ud. De	Válvula de mariposa DN 500. Fabricada en PP. Activación manual.	1.917,39 €	3.834,78 €
					<u>7.184,00 €</u>

Subcapítulo 02.3. Ventilador

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C02.3.1.	1	Ud. De.	Ventilador centrífugo de alta presión con accionamiento por poleas y correa, modelo CRNT-TR/1251. Fabricado en chapa de acero protegida con capa de poliéster. Rodete de álabes curvados. 400/690 V/ 50 Hz/3F /IP55. Potencia instalada 75 kW.	18.900,00 €	18.900,00 €
					<u>18.900,00 €</u>

Subcapítulo 02.4. Chimenea

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C02.4.1.	1	Ud. De.	Chimenea construida en polipropileno homopolímero 15 mm refretado con poliéster 5 mm. Altura 22000 mm. Diámetro 1000 mm. Incluye estructura de soporte y acceso.	96.800,00 €	96.800,00 €

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

C02.4.2.	1	Ud. De.	Conexión de 550 x 730 mm a 660 x 730 mm. Longitud 450 mm. Fabricada en PP.	2.076,79 €	2.076,79 €
					<u>96.800,00 €</u>

TOTAL CAPITULO 2. CONDUCCIONES DE AIRE 142.928,17 €

CAPITULO 3. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS

Subcapítulo 03.1. Conducciones

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C03.1.1	43,9	m	Tubería de presión AIQSA DN20 PN6 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	0,95 €	41,71 €
C03.1.2.	8	Ud. De	Codo 90° largo DN20 PN10 fabricado en PP.	3,94 €	31,52 €
C03.1.3.	2	Ud. De	Te larga DN20 PN10 fabricada en PP.	4,20 €	8,40 €
C03.1.4.	10,2	m	Tubería de presión AIQSA DN50 PN6 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	4,29 €	43,76 €
C03.1.5.	2	Ud. De	Codo 90° largo DN50 PN10 fabricado en PP.	7,96 €	15,92 €
C03.1.6.	1	Ud. De	Te larga DN50 PN10 fabricada en PP.	9,13 €	9,13 €
C03.1.7.	9,22	m	Tubería de presión AIQSA DN90 PN6 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	13,51 €	124,56 €
C03.1.8.	6	Ud. De	Codo 90° largo DN90 PN10 fabricado en PP.	17,64 €	105,84 €
C03.1.9	2	Ud. De	Te larga DN90 PN10 fabricada en PP.	29,03 €	58,06 €
C03.1.10	16,2	m	Tubería de presión AIQSA DN110 PN6 fabricada en Polipropileno Homopolímero.	20,22 €	327,56 €
C03.1.11.	6	Ud. De	Codo 90° largo DN110 PN10 fabricado en PP.	27,84 €	167,04 €
C03.1.12.	2	Ud. De	Te larga DN110 PN10 fabricada en PP.	41,17 €	82,34 €
C03.1.13.	1	Ud. De	Reducción larga concéntrica DN110/50 PN10 fabricada en PP.	35,27 €	35,27 €
					<u>1.051,11 €</u>

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Subcapítulo 03.2. Accesorios

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C03.2.1.	8	Ud. De	Válvula de bola DN20 fabricada en PP.	4,52 €	36,16 €
C03.2.2.	4	Ud. De	Válvula de bola DN50 fabricada en PP.	11,47 €	45,88 €
C03.2.3.	8	Ud. De	Válvula de bola DN90 fabricada en PP.	99,36 €	794,88 €
C03.2.4.	8	Ud. De	Válvula de bola DN110 fabricada en PP.	150,47 €	1.203,76 €
C03.2.5.	2	Ud. De	Válvula antirretorno de membrana DN20 fabricada en PP.	6,89 €	13,78 €
C03.2.6.	2	Ud. De	Válvula antirretorno de membrana DN50 fabricada en PP.	14,58 €	29,16 €
C03.2.7.	2	Ud. De	Válvula antirretorno de membrana DN90 fabricada en PP.	60,18 €	120,36 €
C03.2.8.	4	Ud. De	Válvula antirretorno de membrana DN110 fabricada en PP.	66,99 €	267,96 €
C03.2.9.	4	Ud. De	Válvula automática de bola en acero inoxidable con actuador neumático de doble efecto DN20.	224,25 €	897,00 €
					3.408,94 €

Subcapítulo 03.3. Bombas

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C03.3.1.	6	Ud. De	Bomba centrífuga modelo RFXA 32-12/1,5. Fabricada en AISI 304. 230/400 V/ 3F/50 Hz /IP55. Potencia 1,1 kW.	1.275,00 €	7.650,00 €
C03.3.2.	4	Ud. De	Bomba centrífuga modelo RFXA 40-16/5,5. Fabricada en AISI 304. 230/400 V/ 3F/50 Hz /IP55. Potencia 4 kW.	2.058,00 €	8.232,00 €
C03.3.3.	4	Ud. De	Bomba centrífuga modelo RFXA 65-20/30. Fabricada en AISI 304. 230/400 V/ 3F/50 Hz /IP55. Potencia 22 kW.	7.441,00 €	29.764,00 €
					45.646,00 €

TOTAL CAPITULO 3. CONDUCCIONES HIDRÁULICAS

50.106,05 €

CAPITULO 04. INSTRUMENTACIÓN

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C04.1.	4	Ud. De	Transmisor conductividad eléctrica Hanna Instruments modelo HI8936 AL. Rango 0,0 a 199,9 mS, salida 4-20 mA.	385,00 €	1.540,00 €
C04.2.	4	Ud. De	Sonda de conductividad eléctrica Hanna Instruments modelo HI7638. Cuatro anillos de platino, cuerpo plástico y vidrio, sensor de temperatura NTC, 5 bar, 3 m de cable conector DIN.	346,00 €	1.384,00 €
C04.3.	4	Ud. De	Transmisor pH Hanna Instruments modelo HI8614 LN. Con pantalla y salida aislada 4-20 mA.	525,00 €	2.100,00 €
C04.4.	4	Ud. De	Electrodo de pH Hanna Instruments modelo HI1210 T. Cuerpo plástico, unión de fibra, 3 bar, conector tipo T.	160,00 €	640,00 €
C04.5.	4	Ud. De	Sonda de temperatura Hanna Instruments modelo HI76608. Para transmisor de pH HI8614 LN, 3 m de cable.	95,00 €	380,00 €
C04.6.	4	Ud. De	Caudalímetro de tipo magnético YOKOGAWA modelo ADMAG CA. DN20, alimentación 100-130 V DC, salida 4-20 mA.	1.740,00 €	6.960,00 €
C04.7.	14	Ud. De	Manómetro con muelle tubular Genebre referencia 8012. Rango 0-25 bar, conexión acero inoxidable con salida inferior 1/2", doble escala psi/bar.	58,24 €	815,36 €
					<hr/> 13.819,36 € <hr/>

TOTAL CAPITULO 4. INSTRUMENTACIÓN

13.819,36 €

CAPITULO 05. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA

Subcapítulo 05.1. Línea de distribución

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C05.1.1	183	m	Cable trifásico tipo ACEFLEX ca, RV-K, con conductor de aluminio 1,5 mm ² , aislamiento XLPE3, tensión nominal 0,6/1 kV.	0,86 €	157,38 €
C05.1.1	67	m	Cable trifásico tipo ACEFLEX ca, RV-K, con conductor de aluminio 25 mm ² , aislamiento XLPE3, tensión nominal 0,6/1 kV.	10,09 €	676,03 €
C05.1.3.	21	m	Cable trifásico tipo ACEFLEX ca, RV-K, con conductor de aluminio 150 mm ² , aislamiento XLPE3, tensión nominal 0,6/1 kV.	77,01 €	1.617,21 €
C05.1.4.	246	m	Cable monofásico tipo ACEFLEX ca, RV-K, con conductor de aluminio 2,5 mm ² , aislamiento XLP3, tensión nominal 0,6/1 kV.	0,93 €	228,78 €
C05.1.5.	42	m	Soporte aéreo compuesto por bandejas de rejilla electrosoldada de alta resistencia, rejiband, 60 x 600 mm. Incluye soportaciones, uniones y bifurcaciones.	59,22 €	2.487,24 €
					<hr/> 5.166,64 € <hr/>

Subcapítulo 05.2. Variadores de frecuencia

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C05.2.1.	6	Ud. De	Variador de velocidad Schneider modelo Altivar Process ATV600 ATV630U15N4 1,5kW/2hp 380/480 V.	785,24 €	4.711,44 €
C05.2.2.	4	Ud. De	Variador de velocidad Schneider modelo Altivar Process ATV600 ATV630U40N4 4kW/5hp 380/480 V.	1.033,96 €	4.135,84 €
C05.2.3.	4	Ud. De	Variador de velocidad Schneider modelo Altivar Process ATV600 ATV630D22N4 22kW/30hp 380/480 V.	2.923,08 €	11.692,32 €

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

C05.2.4.	1	Ud. De	Variador de velocidad Schneider modelo Altivar Process ATV600 ATV630D75N4 75kW/100hp 380/480 V.	6.701,79 €	6.701,79 €
					<u>27.241,39 €</u>

Subcapítulo 05.3. Aparamenta eléctrica

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C05.3.1.	1	Ud. De	Interruptor automático Schneider modelo NSX400N.	3.332,89 €	3.332,89 €
C05.3.2.	10	Ud. De	Interruptor automático Schneider modelo Compact NSXm LV426100 16A 3P 16kA a 380/415 V.	407,71 €	4.077,10 €
C05.3.3.	4	Ud. De	Interruptor automático Schneider modelo Compact NSXm LV426103 40A 3P 16kA a 380/415 V.	407,71 €	1.630,84 €
C05.3.4.	1	Ud. De	Interruptor automático Schneider modelo Compact NSXm LV426108 125A 3P 16kA a 380/415 V.	617,57 €	617,57 €
					<u>9.658,40 €</u>
<u>TOTAL CAPITULO 5. INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA</u>					<u>42.066,43 €</u>

CAPITULO 06. OBRA CIVIL

Subcapítulo 06.1. Acondicionamiento del terreno

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C06.1.1.	86	m2	Demolición de pavimento interior de hormigón.	14,60 €	1.255,60 €
C06.1.2.	43	m3	Transporte de escombros con camión a gestor autorizado.	2,69 €	115,67 €
C06.1.3.	43	m3	Canon de vertido por entrega de residuos a gestor autorizado.	7,08 €	304,44 €
					<u>1.675,71 €</u>

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

Subcapítulo 06.2. Cimentaciones

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C06.2.1.	86	m2	Capa de hormigón de limpieza.	7,49 €	644,14 €
C06.2.2.	86	m2	Impermeabilización bajo losa de cimentación con láminas asfálticas.	14,74 €	1.267,64 €
C06.2.3.	43	m3	Losa de cimentación.	174,32 €	7.495,76 €
C06.2.4.	86	m2	Impermeabilización de losa de cimentación, mediante saturación de la red capilar del hormigón.	7,21 €	620,06 €
					10.027,60 €

Subcapítulo 06.3. Construcción del cubeto de retención

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C06.3.1.	24,3	m2	Sistema de encofrado para pantalla de hormigón.	15,18 €	368,87 €
C06.3.2.	7,29	m3	Núcleo o pantalla de hormigón. Altura 400 mm y espesor 300 mm.	256,06 €	1.866,68 €
C06.3.3.	110,3	m2	Impermeabilización mediante revestimiento bituminoso del interior del cubeto.	8,01 €	883,50 €
					3.119,05 €

TOTAL CAPITULO 6. OBRA CIVIL **14.822,36 €**

CAPITULO 07. INGENIERÍA

Subcapítulo 07.1. Estudio de alternativas

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C07.1.1.	1650	h	Horas Ingeniero Industrial Junior.	22,00 €	36.300,00 €

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

C07.1.2.	50	h	Horas Ingeniero Industrial.	30,00 €	1.500,00 €
					37.800,00 €

Subcapítulo 07.2. Proyecto de diseño

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C07.2.1.	9900	h	Horas Ingeniero Industrial Junior.	22,00 €	217.800,000 €
C07.2.2.	2475	h	Horas Ingeniero Industrial.	30,00 €	74.250,00 €
					292.050,00 €

Subcapítulo 07.3. Dirección de obras

Código	Cant.	Ud.	Descripción	P.Unitario	P.Total
C07.3.1.	132	h	Horas Ingeniero Industrial Junior.	22,00 €	2.904,00 €
C07.3.2.	132	h	Horas Ingeniero Industrial.	30,00 €	3.960,00 €
					6.864,00 €

TOTAL CAPITULO 7. INGENIERÍA	336.714,00 €
-------------------------------------	---------------------

TOTAL CAPÍTULOS	757.517,14 €
------------------------	---------------------

Documento nº 3:

PLANOS

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)

ÍNDICE DE PLANOS

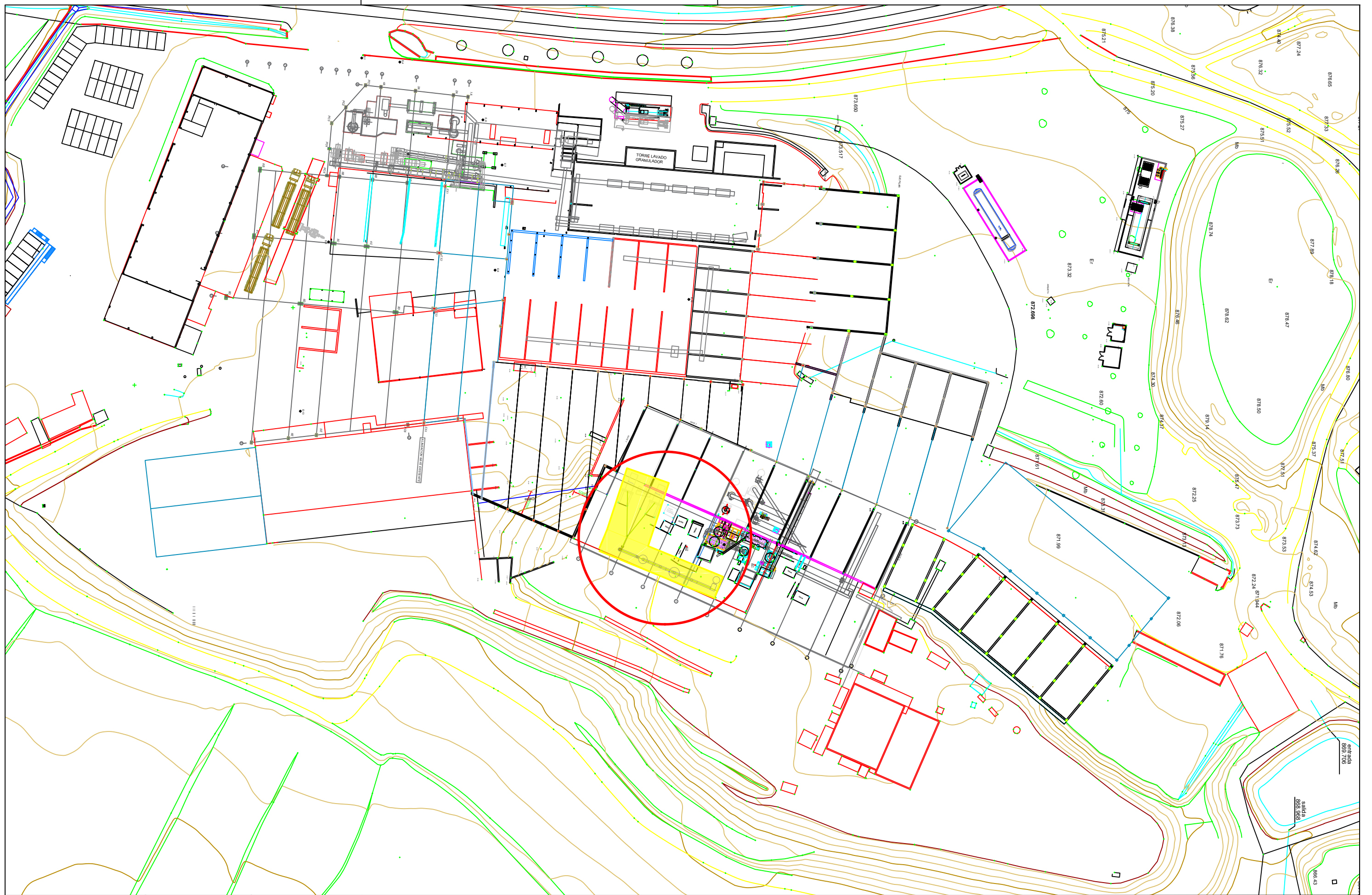
Plano nº 1. Ubicación del sistema de tratamiento de gases.

Plano nº 2. Detalle de los equipos: ciclón, lavador Venturi y torre de aspersión.

Plano nº 3. Sistema con conducciones y accesorios de aspiración. Izq.: sin torre de aspersión. Dcha.: completo.

Plano nº 4. Esquema unifilar de la instalación.

Diseño de un Sistema de Tratamiento de Gases Residuales para una Fábrica de Fertilizantes
ubicada en Sarrión (Teruel)



TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERIA INDUSTRIAL

Proyecto: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE GASES RESIDUALES PARA UNA FÁBRICA DE FERTILIZANTES UBICADA EN SARRIÓN (TERUEL)**

Plano: **Ubicación del sistema de tratamiento de gases**

Fecha: **Septiembre 2018**

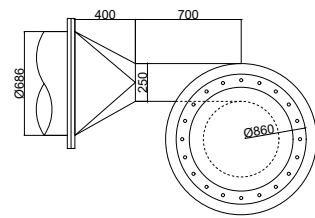
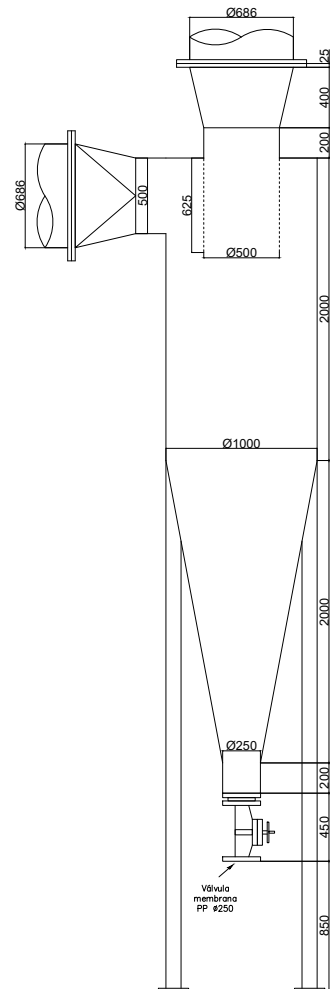
Nº Plano:



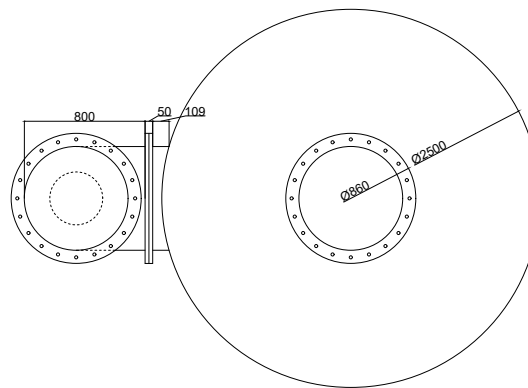
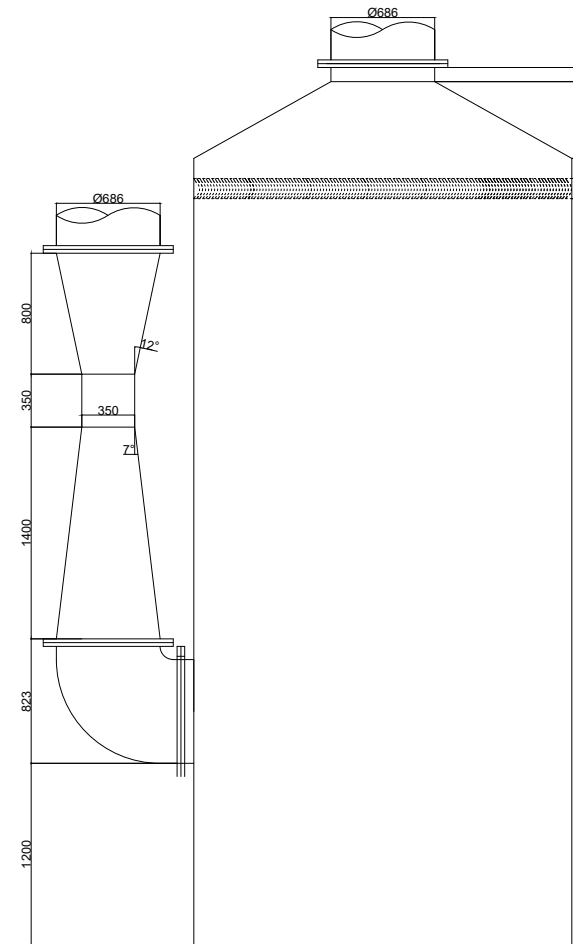
Autor: **Lorena Hernández Pérez**

Escala: **1:1000**

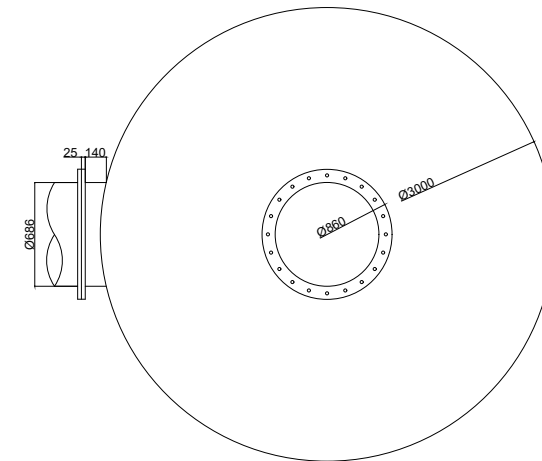
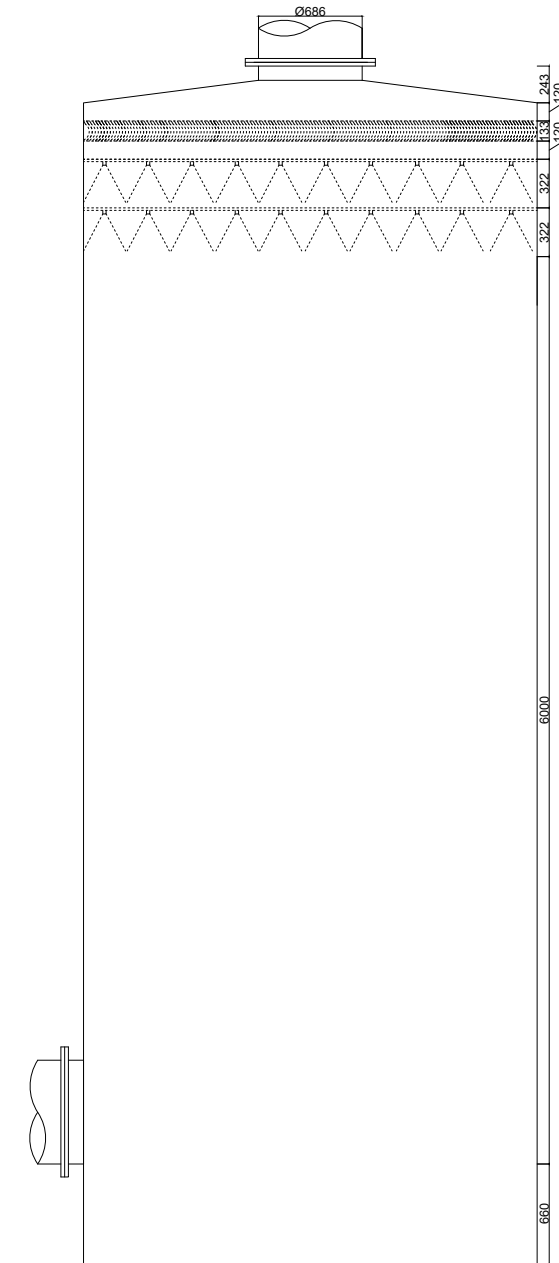
1



CICLÓN



LAVADOR VENTURI



TORRE DE ASPERSIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

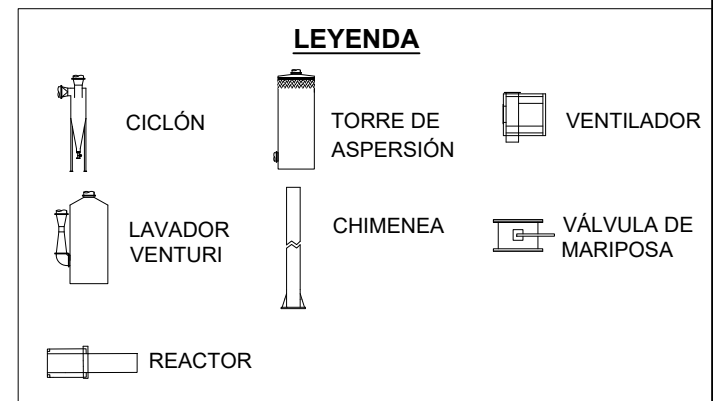
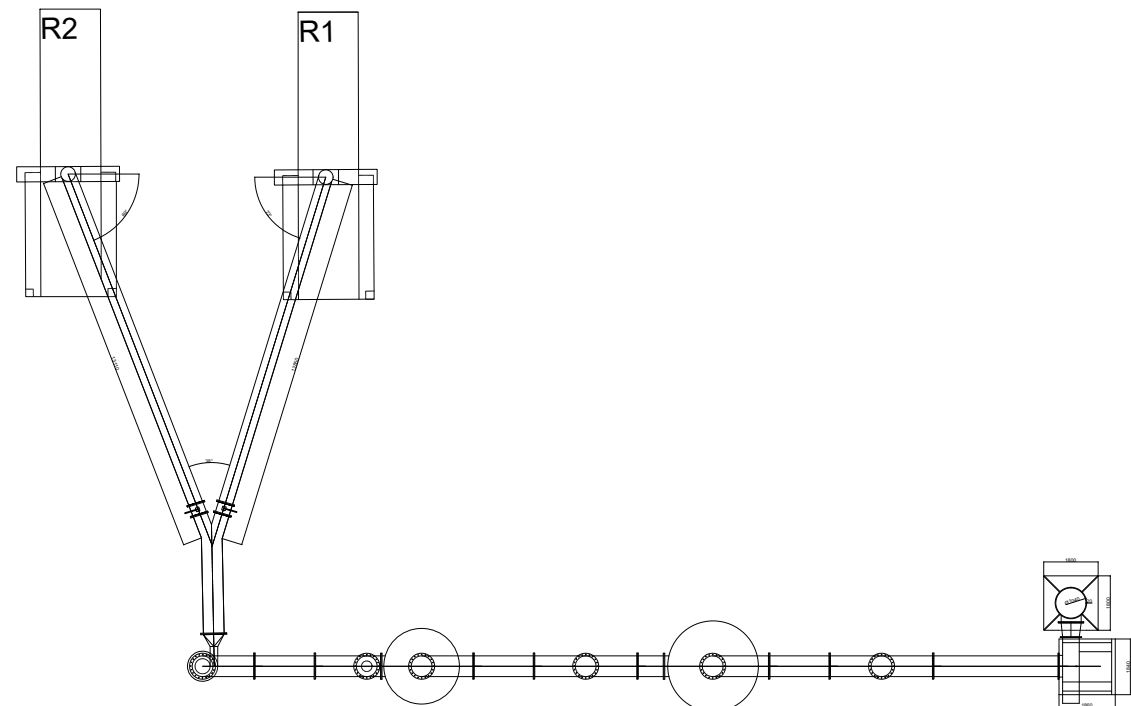
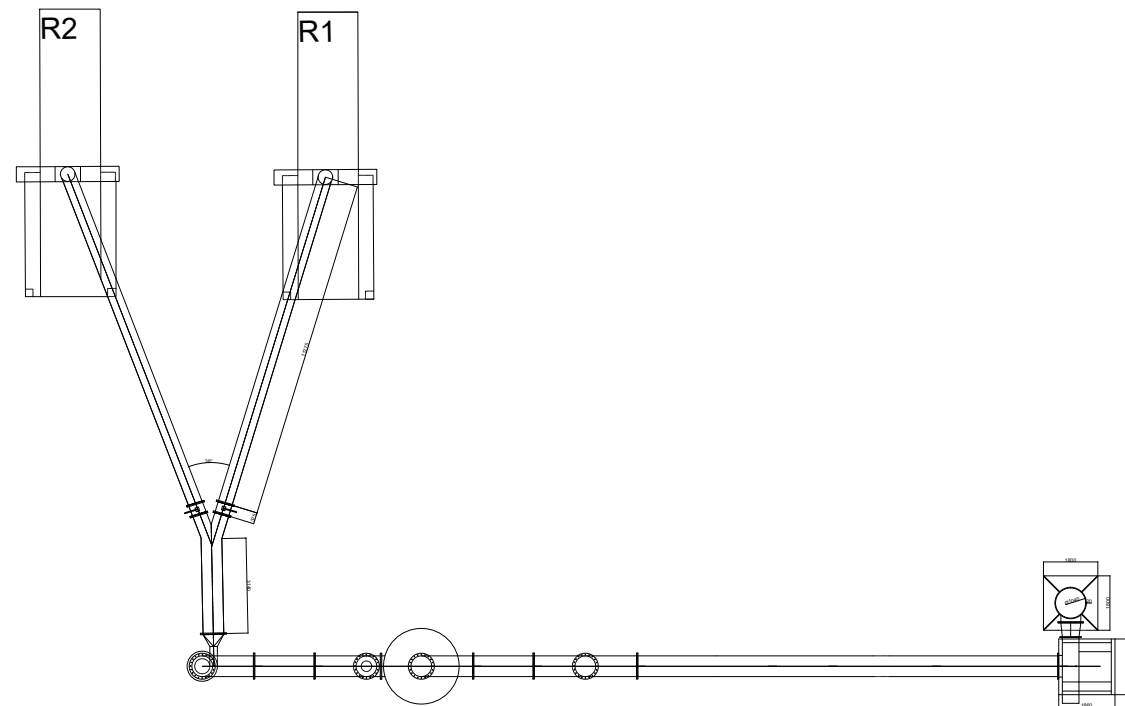
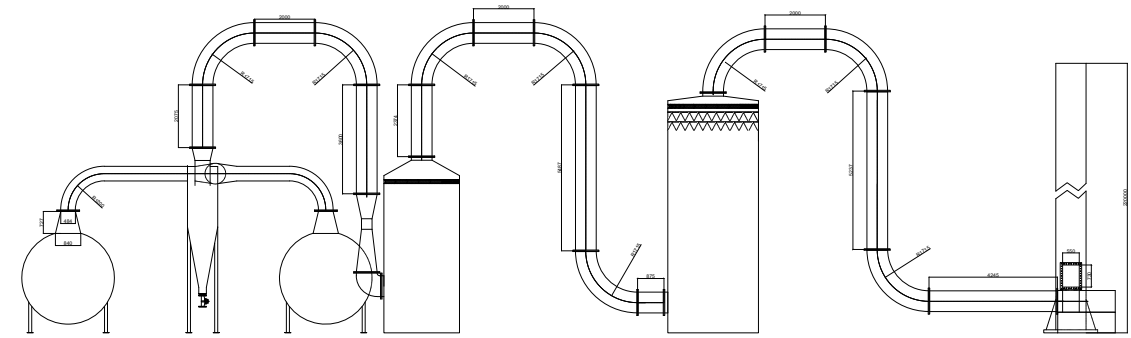
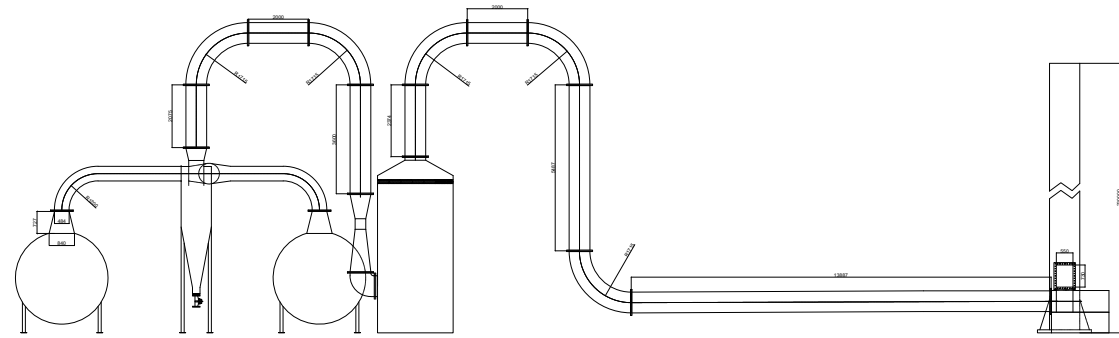


Proyecto: DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE GASES RESIDUALES PARA UNA FÁBRICA DE FERTILIZANTES UBICADA EN SARRIÓN (TERUEL)

Plano: Detalle de los equipos: ciclón, lavador Venturi y torre de aspersión
 Autor: Lorena Hernández Pérez

Fecha: Septiembre 2018
 Escala: 1:50

Nº Plano: 2



Cuadro de alimentación secundario

